



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Civil
2014

**Alexandre Fernandes
Peralta**

**RESISTÊNCIA AO FOGO DE VIGAS METÁLICAS
COM ENCURVADURA LATERAL**
Influência do tipo de carregamento



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Civil
2014

**Alexandre Fernandes
Peralta**

**RESISTÊNCIA AO FOGO DE VIGAS METÁLICAS
COM ENCURVADURA LATERAL**
Influência do tipo de carregamento

Dissertação de mestrado apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Nuno Filipe Ferreira Soares Borges Lopes, Professor Auxiliar e do Professor Doutor Paulo Jorge de Melo Matias Faria de Vila Real, Professor Catedrático, do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

o júri

presidente

Prof. Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa
professora associada da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Paulo Alexandre Gonçalves Piloto
professor coordenador do Instituto Politécnico de Bragança

Prof. Doutor Nuno Filipe Ferreira Soares Borges Lopes
professor auxiliar da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Dado por concluída mais uma fase da minha vida gostaria de deixar algumas palavras de agradecimento a todos os que me ajudaram a concretizar este objetivo.

Em primeiro lugar, agradeço ao meu orientador Prof. Nuno Lopes por toda a atenção, dedicação, pontualidade e disponibilidade, boa disposição e sobretudo pela paciência prestada durante todo este percurso.

Agradeço também ao meu coorientador Prof. Paulo Vila Real por toda a ajuda e apoio prestado, boa disposição, bem como toda a persistência e partilha de conhecimento transmitido.

A todos aqueles com quem tive o prazer de partilhar estes cinco anos em Aveiro, a todos os que passaram pelo “DEC”, alunos, professores e funcionários, a toda a equipa de futsal de Engenharia Civil, especialmente a Daniela, Carlota, Catarina, Fábio, Inês, Liu, Vera e Eurico, um obrigado por todo o apoio e por todos os momentos que passamos juntos. Ficarão para sempre marcados no meu coração.

Gostaria especialmente de agradecer ao André Lourenço, amigo que acompanhou mais de perto todo este trajeto, por tudo o que tive oportunidade de viver com ele, em particular pelo seu forte e incansável companheirismo e boa disposição.

A todos os que acompanharam esta caminhada à distância, pela profunda amizade que os distingue, João Carlos, Telmo, João Miguel, Hélder, Miguel, Sílvia, Andreia, Ana, Sara e Filipe, David, Siopa, Élia, obrigado por tudo.

Por último, o mais especial agradecimento, aos meus pais e à minha irmã pela forma como dirigiram todo este caminho não deixando que, em momento algum, alguma coisa me faltasse, por todo o apoio, força e motivação, conselhos e advertências e por tudo aquilo que jamais as palavras possam caracterizar, a vocês dedico este documento.

palavras-chave

Encurvadura lateral-torsional, tipo de carregamento, situação de incêndio, Eurocódigo 3

resumo

Ao longo dos anos tem sido analisado o efeito de vários fatores que devem ser tidos em conta na verificação da encurvadura lateral em elementos estruturais metálicos, resultando na proposta de diferentes formas de cálculo.

A presente dissertação tem como interesse analisar diferentes metodologias de cálculo da resistência à encurvadura lateral de elementos em aço em situação de incêndio incluindo a metodologia preconizada pela parte 1-2 do Eurocódigo 3.

O estudo aqui apresentado tem como principal objetivo mostrar de que forma é que a influência do tipo de carregamento a que uma viga está sujeita contribui para um aumento ou diminuição da resistência à encurvadura lateral em situação de incêndio.

Com esse fim, as resistências obtidas por diferentes propostas de cálculo são comparadas com valores obtidos por simulação numérica através do programa de elementos finitos SAFIR.

keywords

Lateral-torsional buckling, loading type influence, case of fire, Eurocode 3

abstract

Over the years, the effect of several factors that should be taken into account on the safety verification of the lateral torsional buckling resistance on structural elements have been studied, which resulted in different proposals for its calculation.

The focus of the present thesis is to analyze different approaches for the calculation of the lateral - torsional buckling resistance of steel I-beams under fire conditions, including the methodology proposed in the part 1-2 of Eurocode 3.

The main goal of this study is to show how the influence of the loading type to which a beam is subjected can contribute to an increase or decrease of the lateral-torsional buckling resistance in case of fire.

With that point in mind, the resistance values obtained from different design proposals are compared with the obtained results by numerical simulation applying the finite element program SAFIR.

ÍNDICE

Índice de Figuras	III
Índice de Tabelas	V
Nomenclatura.....	VI
Lista de Acrónimos.....	IX
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Considerações gerais	1
1.2. Enquadramento	2
1.3. Âmbito e Objetivos.....	3
1.4. Casos de Estudo	4
1.5. Estrutura da Dissertação	6
2. ENCURVADURA LATERAL.....	9
2.1. Conceito.....	9
2.2. Momento crítico.....	10
3. PROPOSTAS DE DIMENSIONAMENTO	17
3.1. Temperatura normal.....	17
3.1.1. NP EN 1993-1-1	18
3.1.1.1. Regras de cálculo.....	18
3.1.1.2. Observações.....	23
3.1.2. Proposta de alteração ao Eurocódigo 3, parte 1-1	24
3.1.2.1. Regras de cálculo.....	24
3.1.2.2. Observações.....	27
3.2. Temperaturas elevadas.....	29
3.2.1. NP EN 1993-1-2	30
3.2.1.1. Regras de Cálculo	30
3.2.1.2. Observações.....	33
3.2.2. Nova Proposta.....	33
3.2.2.1. Fator de imperfeição	34
3.2.2.2. Influência do tipo de carregamento - Fator f	35

3.2.3. Nova Proposta – Introdução de uma nova expressão para o fator f	38
3.2.4. Proposta “AM-1-1-2012-01” adaptada a temperaturas elevadas.....	40
3.2.4.1. Regras de Cálculo	40
3.2.4.2. Observações.....	41
4. ANÁLISE DA PRECISÃO DAS PROPOSTAS	47
4.1. Fator de imperfeição	47
4.1.1. Influência do tipo de aço.....	47
4.1.2. Influência da esbelteza da secção	49
4.1.3. Influência das tensões residuais.....	51
4.1.4. Observações.....	52
4.2. Influência do tipo de carregamento	56
4.2.1. Casos de Estudo.....	56
4.2.2. Curvas de encurvadura	57
4.3. Estatística.....	63
4.3.1. Método de análise	64
4.3.2. Observações.....	65
5. ESTUDO NUMÉRICO DE CASOS ADICIONAIS	73
5.1. Modelo Numérico	74
5.2. Curvas de encurvadura	76
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
ANEXOS	91

Índice de Figuras

Figura 1- Carregamentos analisados.....	5
Figura 2 – Instabilidade lateral de vigas – trajetórias de equilíbrio (Reis e Camotim, 2001).....	9
Figura 3- Viga simplesmente apoiada em apoios em “forquilha” (Vila Real et al., 2007a).	11
Figura 4- Encurvadura lateral em viga de secção I sujeita a um momento flector constante (Simões, 2007).....	12
Figura 5 – Situações de carregamento (Galéa, 2002)	14
Figura 6 – Curvas de encurvadura apresentadas pela NP EN 1993-1-1 (CEN, 2005a).	19
Figura 7 – Influência da consideração da distribuição de momentos flectores no cálculo da resistência à encurvadura lateral à temperatura normal.	23
Figura 8 – HEB 200 Laminado ($h/b < 1.2$).....	27
Figura 9 – IPE 500 S235 Laminado ($h/b > 1.2$).....	28
Figura 10 – IPE 500 S235 Soldado.....	28
Figura 11 – Fatores de redução para a relação tensões-extensões do aço carbono a temperaturas elevadas.	32
Figura 12 – Resultado dos efeitos: tensões residuais, imperfeições geométricas e tipo de aço a atuar em simultâneo comparado com a curva obtida pela equação do Eurocódigo 3, parte 1-2 (Vila Real et al., 2004a).....	33
Figura 13 – IPE 500 de secção soldada de aço do tipo S 460.....	35
Figura 14 – Nova proposta para diferentes diagramas de momentos (Vila Real et al., 2007b).....	37
Figura 15 – Comparação entre a EN 1993-1-2, a Nova Proposta e resultados numéricos	37
Figura 16 – Comparação feita entre os métodos apresentados em Nova Proposta, Nova Proposta adaptada de um novo fator f , parte 1-2 do Eurocódigo e resultados numéricos SAFIR.	40
Figura 17 – Comparação entre o método preconizado pelo EN 1993-1-2 e pela primeira abordagem feita à proposta AM-1-1-2012-01 a elevadas temperaturas.	42
Figura 18 – Comparação das curvas obtidas pelas duas abordagens com a curva da parte 1-2 do EC3	43
Figura 19 – Influência do tipo de aço nas curvas de encurvadura lateral: a) S235, b) S355 e c) S460.....	49
Figura 20 – HEB 500 S235 Laminado ($h/b < 2$).....	50
Figura 21 – IPE 220 S235 Laminado ($h/b = 2$).....	50
Figura 22 – IPE 500 S235 Laminado ($h/b > 2$).....	51
Figura 23 – HEA 500 Laminado S 460	52
Figura 24 – HEA 500 Soldado S 460.....	52
Figura 25 – IPE 220 Laminado S 235.....	55

Figura 26 – IPE 500 Soldado S 460.....	55
Figura 27 – Tipos de carregamentos considerados.	57
Figura 28 – Curvas de encurvadura analisadas comparadas com os resultados numéricos obtidos para o IPE 220 laminado S 235 para os 11 carregamentos estudados.....	62
Figura 29 – Análise estatística de todos os métodos analíticos comparados com os valores obtidos pelo programa SAFIR para o tipo de carregamento $\psi=1$	67
Figura 30 – Análise estatística de todos os métodos analíticos comparados com os valores obtidos pelo programa SAFIR para o tipo de carregamento $\psi=0$	68
Figura 31 – Análise estatística de todos os métodos analíticos comparados com os valores obtidos pelo programa SAFIR para o tipo de carregamento $\psi=-1$	69
Figura 32 – Modelo viga simplesmente apoiada nas extremidades em apoios em forquilha	74
Figura 33 – Tensões residuais secção laminada: C – zona comprimida; T – zona tracionada.....	75
Figura 34 – Modelo numérico utilizado e respetivos diagramas de momento.....	76
Figura 35 – IPE 220 Laminado S 235 analisado para três situações de carregamento distintas.....	78

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Curvas de encurvadura lateral recomendadas para secções transversais quando é utilizada a expressão (13) (CEN, 2005a).....	20
Tabela 2 – Valores recomendados dos fatores de imperfeição para as curvas de encurvadura lateral segundo NP EN 1993-1-1 (CEN, 2005a)	20
Tabela 3 – Curvas de encurvadura lateral a utilizar consideradas secções laminadas ou soldadas equivalentes.....	21
Tabela 4 – Fatores de correção k_c	22
Tabela 5 – Fator de imperfeição para secções duplamente simétricas (Taras et al., 2013).....	25
Tabela 6 – Valores de f_M em função do carregamento (Taras et al., 2013)	26
Tabela 7 – Fatores de redução para a relação tensões-extensões do aço carbono a temperaturas elevadas (CEN, 2005b).....	32
Tabela 8 – Valores de β obtidos pelos autores (Vila Real et al., 2007a)	34
Tabela 9 – Fatores de correção k_c para a nova proposta (Vila Real et al., 2007b)	36
Tabela 10 – Valores de f atribuído a cada carregamento para cada uma das expressões consideradas	39
Tabela 11 – Fatores de imperfeição segundo o EN 1993-1-2	48
Tabela 12 – Casos de estudo	63
Tabela 13 – Resultados estatísticos para as situações de carregamento $\psi=1$, $\psi=0$, $\psi=-1$	65
Tabela 14 – Resultados estatísticos para os restantes carregamentos: $\psi=0.5$, $\psi=-0.5$,.....	70
Tabela 15 - Momentos considerados para as situações de carregamento em análise.....	73
Tabela 16 – Valores de C_1 e k_c correspondentes aos carregamentos tidos em conta nesta secção.	77

Nomenclatura

Letras maiúsculas latinas

A	Área da secção transversal
C_1, C_2, C_3	Coefficientes que dependem do tipo de carregamento
E	Módulo de elasticidade longitudinal do aço
E_a	Módulo de elasticidade longitudinal do aço à temperatura normal
$E_{a,\theta}$	Inclinação da reta que representa o domínio elástico para o aço a temperaturas elevadas θ_a
G	Módulo de distorção
I	Momentos de inercia
I_y	Momentos de inércia em relação ao eixo y-y
I_z	Momentos de inércia em relação ao eixo z-z
I_t	Momento de inércia de torção
I_w	Constante de empenamento
L	Comprimento do elemento
M	Valor de momento atuante
$M_{b,fi,t,Rd}$	Valor de cálculo do momento resistente à encurvadura lateral, em situação de incêndio, no instante t
$M_{b,Rd}$	Valor de cálculo do momento resistente à encurvadura lateral
$M_{b,Rd}^{SAFIR}$	Valor de cálculo do momento resistente à encurvadura lateral obtido pelo SAFIR em situação de incêndio
M_{cr}	Momento crítico para encurvadura lateral
$M_{c,Rd}$	Momento fletor resistente da secção
M_{Ed}	Valor de cálculo do momento fletor atuante
M_{Rd}	Valor de cálculo do momento fletor resistente
N_{cr}	Valor crítico do esforço normal associado à encurvadura elástica por flexão
P	Valor de carga atuante
Γ	Parâmetro que caracteriza a torção não uniforme
W_y	Módulo de flexão segundo o eixo y-y

$W_{eff,y}$	Módulo de flexão da secção transversal efetiva segundo y-y
$W_{el,y}$	Módulo de flexão elástico segundo o eixo y-y
$W_{el,z}$	Módulo de flexão elástico segundo o eixo z-z
$W_{pl,y}$	Módulo de flexão plástico segundo o eixo y-y

Letras minúsculas latinas

b	Largura da secção transversal
f	Fator que tem em conta a distribuição de momentos
f_M	Fator que tem em conta a distribuição de momentos
f_y	Tensão de cedência do aço a 20 °C
$f_{y,\theta}$	Tensão de cedência efetiva do aço a temperaturas elevadas θ_a
h	Altura da secção transversal
k	Fator que tem em conta a rotação na extremidade do elemento
k_c	Fator de correção que depende da distribuição de momentos
k_w	Fator relativo ao empenamento na extremidade do elemento
$k_{y,\theta}$	Fator de redução da tensão de cedência do aço à temperatura atingida no instante t
$k_{E,\theta}$	Fator de redução para a inclinação da reta que representa o domínio elástico à temperatura do aço θ_a atingida no instante t
l	Comprimento do elemento
z_g, z_j	Distância no eixo z-z entre o ponto de aplicação da carga e o centro de corte

Caracteres do alfabeto grego

α	Fator de imperfeição;
α_{LT}	Fator de imperfeição para a encurvadura lateral
β	Fator de correção das curvas de dimensionamento à encurvadura lateral de vigas constituídas por perfis laminados e soldados equivalentes
χ	Fator de redução para encurvadura por flexão
χ_{LT}	Fator de redução para a encurvadura lateral
$\chi_{LT,fi}$	Fator de redução para a encurvadura lateral, em situação de incêndio
$\chi_{LT,fi}^{SAFIR}$	Fator de redução para a encurvadura lateral obtido pelo SAFIR em situação de incêndio
Φ_{LT}	Coefficiente utilizado para o cálculo do fator de redução da encurvadura lateral

$\Phi_{LT,\theta}$	Coeficiente utilizado para o cálculo do fator de redução da encurvadura lateral, em situação de incêndio
γ_{M1}	Coeficiente parcial de segurança refere-se à resistência dos elementos em relação a fenômenos de encurvadura
$\bar{\lambda}_{LT}$	Esbelteza normalizada para encurvadura lateral
$\bar{\lambda}_{LT,\theta}$	Esbelteza normalizada para encurvadura lateral em situação de incêndio
ψ	Relação entre os momentos que atuam nas extremidades de um segmento de um elemento
μ	Valor médio
σ	Desvio Padrão

Lista de Acrónimos

CEN	Comité Europeu de Normalização
EC3	Eurocódigo 3
EN 1993-1-1	Parte 1-1 do Eurocódigo 3
EN 1993-1-2	Parte 1-2 do Eurocódigo 3
SAFIR	Safety Fire Resistance. Programa baseado no método dos elementos finitos para análise térmica e estrutural desenvolvido por Franssen
EN	Norma Europeia
NP	Norma Nacional Portuguesa
LTB	Lateral-torsional buckling

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações gerais

1.2 Enquadramento

1.3 Âmbito e Objetivo

1.4 Casos de Estudo

1.5 Estrutura da Dissertação

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações gerais

Todas as estruturas, durante o seu período de vida útil, devem apresentar características de resistência e rigidez suficientes para que o seu comportamento, face às solicitações, seja o mais adequado.

Muitas razões têm contribuído para o aumento do uso de elementos em aço na construção: a sua eficiência estrutural, que por sua vez pode levar a economias significativas de material; o facto de ser um material leve e ter resistências elevadas providenciando boa relação resistência/peso. Isto leva a uma exigente otimização de material para o projeto estrutural, que se pode traduzir, no caso de vigas, em elementos mais leves (Benyamina et al., 2013).

Para aproveitar ao máximo essas vantagens, um dos critérios que tem de ser tido em conta no cálculo da sua resistência estrutural são os fenómenos de instabilidade. No caso de estruturas metálicas, alguns dos fenómenos de instabilidade possíveis de ocorrer são a encurvadura por flexão de colunas, a encurvadura local em placas, banzos e almas de elementos estruturais e ainda a encurvadura lateral de vigas. Estes últimos surgem, por exemplo, quando uma viga de secção transversal em I é fletida sobre o seu eixo principal provocando uma instabilidade que conduz a um comportamento súbito à flexão-torção. Esta instabilidade é designada de encurvadura lateral-torsional ou bambeamento (Benyamina et al., 2013).

Este problema tem vindo a ser estudado ao longo dos anos (Simões da Silva et al., 2009; Taras e Greiner, 2010; Zivner, 2012), para situação em que a temperatura de dimensionamento considerada, corresponde à temperatura normal, 20 °C.

Por outro lado, sabe-se que as propriedades mecânicas do aço dependem da temperatura e da relação tensão-deformação. Assim a resistência de um elemento dada pelo dimensionamento a temperatura elevadas não poderá ser tida em consideração da mesma forma como o é para a temperatura normal. (Vila Real et al., 2004a).

Desta forma, o fenómeno de encurvadura lateral a elevadas temperaturas tem vindo a ser investigado por vários autores a fim de clarificar e otimizar as regras de cálculo necessárias a ter em conta no dimensionamento deste tipo de elementos.

1.2. Enquadramento

Segundo o contexto de dimensionamento preconizado pelo Eurocódigo 3, parte 1-1, o método de cálculo da resistência à encurvadura lateral para elementos duplamente simétricos de classe 1 ou 2 que constava na versão da pré-norma da parte 1-2 do mesmo Eurocódigo 3 (ENV, 1995) é apresentado de forma conservativa para situações de carregamento dadas por uma distribuição de momentos uniforme (Vila Real, 2004b).

Em 2003, Vila Real et al. lançaram uma nova proposta de cálculo da resistência à encurvadura lateral em situação de incêndio diferente da contemplada pelo EN 1993-1-2. Esta foi validada recorrendo a ensaios experimentais e resultados obtidos numericamente para vigas IPE 100 para temperaturas compreendidas entre 20 e 600 °C. Comparados os resultados experimentais, numéricos e analíticos concluíram que a introdução do β , na fórmula do fator de imperfeição, originava uma nova curva de encurvadura com valores de resistência mais elevados e mais próximos dos valores numéricos.

No ano seguinte (Vila Real et al., 2004a) estudaram o efeito das tensões residuais na resistência à encurvadura lateral em temperaturas elevadas.

O estudo foi feito utilizando o recorrente caso de estudo - viga simplesmente apoiada em apoios em forquilha sujeita a momentos nas extremidades. Os resultados permitiram verificar que a influência das tensões residuais é maior para valores de esbelteza intermédios conforme os resultados numéricos obtidos por Vila Real e Franssen em 2001.

No mesmo ano, (Vila Real et al., 2004b) apresentam uma nova reformulação da proposta anteriormente citada a fim de melhorar a curva de encurvadura para situação de incêndio obtida pela parte 1-2 do Eurocódigo 3 desta vez, tendo em consideração novos fatores. É testada a influência do tipo de carregamento no cálculo da resistência à encurvadura lateral, isto é, analisaram a influência da distribuição de momentos dada pela parte 1-1 do Eurocódigo 3 (CEN, 2005a) para secções laminadas a quente ou soldadas equivalente a temperatura ambiente, desta vez adaptando-a ao método EN1993-1-2. Nesta adaptação foi tida em conta a expressão de f , que tem em consideração a influência do tipo de carregamento, para temperaturas elevadas. Utilizou-se um IPE 220 de aço do tipo S 235. Comparando com resultados numéricos verificou-se que a curva obtida ainda se encontrava afastada dos valores pretendidos. Então, no mesmo documento surge uma nova expressão de f melhorada que foi calibrada de forma a coincidir o mais próximo possível dos resultados obtidos pelo programa SAFIR. Embora este estudo numérico tenha sido

desenvolvido apenas para o perfil considerado, os autores (Cazeli et al., 2001) recorrendo a vários estudos paramétricos, tendo em conta diferentes secções e diferentes tipos de aço, concluíram que se poderia adotar este método para os perfis IPE 500 (em representação de $h/b > 2$) e o HEA 500 (em representação de $h/b < 2$).

Mais tarde (Vila Real et al.; 2007a) analisou-se o efeito das tensões residuais, imperfeições geométricas para diferentes tipos de aço propondo um novo fator de imperfeição em função de um valor β que foi determinado em função de cada um desses parâmetros. Estes resultados foram comparados com mais de 5000 simulações numéricas obtidas pelo SAFIR. Foi feita ainda uma análise estatística de todos os resultados analisados.

Refira-se ainda que o estudo da influência do carregamento em situação de incêndio acima referido foi sempre limitado a apenas algumas situações de carregamento que se encontravam tabeladas, embora a formulação de cálculo da resistência à encurvadura lateral existente na parte 1-1 do Eurocódigo 3 tenha sido desenvolvida com o objetivo de considerar qualquer um tipo de carregamento dado por $k_c = \frac{1}{\sqrt{C_1}}$ (CEN, 2005a), em que C_1 é uma constante que figura na expressão do momento crítico de encurvadura lateral de vigas por flexão torção, cujo valor depende das condições de apoio e carregamento e deve ser obtido de literatura especializada (Vila Real e Lopes, 2013).

Recentemente, foi apresentada (Taras et al., 2013) uma nova metodologia de cálculo da resistência à encurvadura lateral para a temperatura normal que irá ser um dos documentos analisados na presente dissertação.

1.3. Âmbito e Objetivos

Neste documento serão apresentadas três propostas de cálculo da resistência à encurvadura lateral em situação de incêndio para elementos com secção de classe 1 e 2, não restringidos lateralmente ao longo do seu comprimento e sujeitos à flexão.

O principal objetivo passa por analisar e perceber de que forma é que as propostas se aproximam do verdadeiro comportamento de elementos em aço para diferentes temperaturas face à encurvadura lateral tendo em conta diferentes situações de carregamento.

Serão apresentadas as curvas de encurvadura obtidas para os diferentes métodos sendo que, para interpretar o seu desenvolvimento, serão utilizados valores numéricos obtidos pelo programa SAFIR para diferentes temperaturas.

Com a finalidade de compreender melhor o comportamento esperado para todos os casos de estudo, será feito um tratamento estatístico dos resultados de resistência determinados para os diferentes métodos comparados com os valores obtidos pelas simulações numéricas.

Por fim, serão analisados três novos casos de estudo com o objetivo de perceber de que forma variam as novas curvas de encurvadura lateral comparando com o método preconizado pela parte 1-2 do Eurocódigo 3.

A principal motivação desta dissertação será mostrar a influência do tipo de carregamento dada por cada uma das propostas a fim de apresentar aquela que poderá ser uma possível metodologia de cálculo da resistência à encurvadura lateral em situação de incêndio a complementar à parte 1-2 do Eurocódigo 3.

1.4. Casos de Estudo

Os casos de estudo considerados neste documento tiveram como referência os modelos padrão utilizados para o estudo da resistência à encurvadura lateral pelos autores mencionados anteriormente.

Foram considerados dois tipos de fabrico para três secções de aço diferentes. Para cada uma destas situações foram analisadas diversas situações de carregamento. Todas essas considerações encontram-se listadas de seguida:

- Fabrico: Laminado e Soldado
- Secções
 - HEA 500
 - IPE 220
 - IPE 500

- Tipo de aço
 - S 235
 - S 355
 - S 460

- Carregamentos

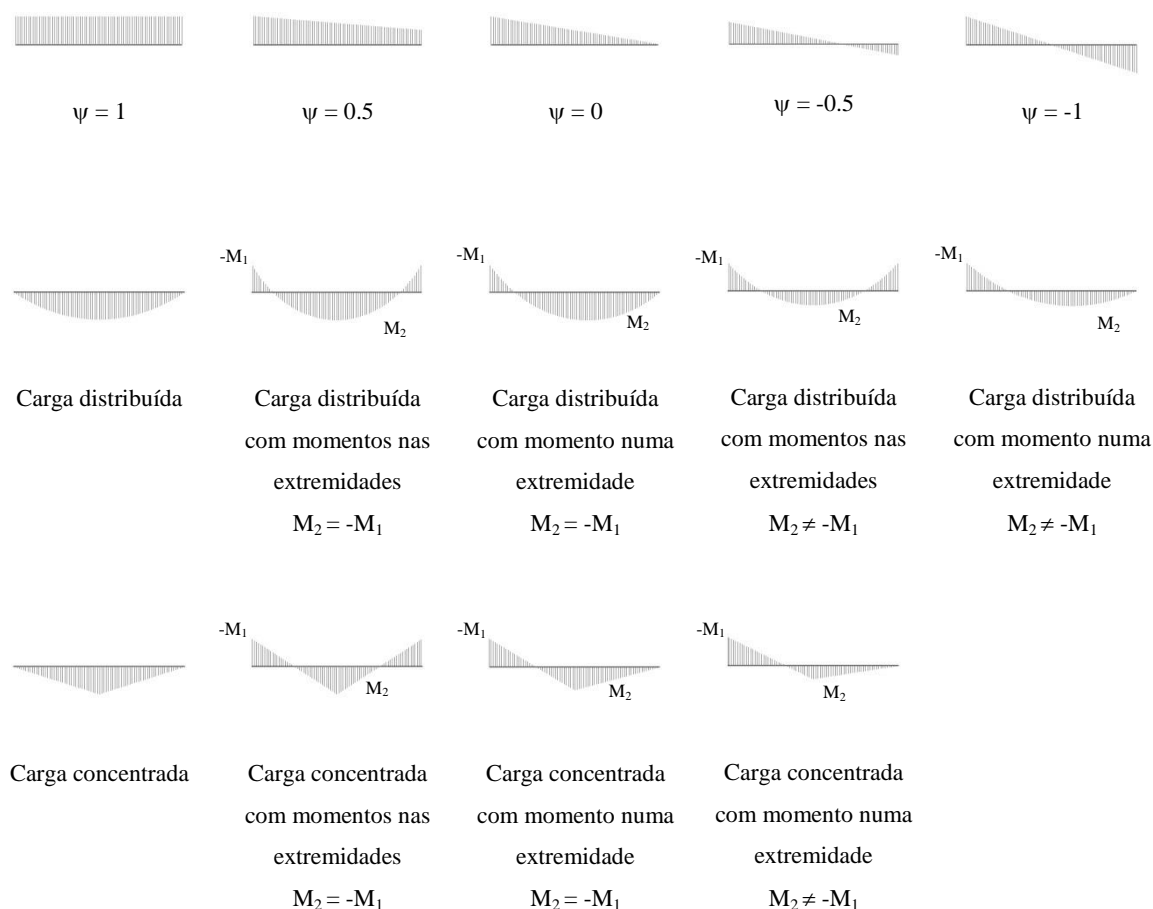


Figura 1- Carregamentos analisados.

Todos os resultados numéricos de resistência à encurvadura lateral para altas temperaturas foram determinados a partir de uma modelação numérica desenvolvida no programa SAFIR (Franssen, 2011), que é um software que permite fazer uma análise geométrica não-linear e material utilizando o código de elementos finitos. Direcionado para o cálculo de resistências em situação de incêndio, este programa foi desenvolvido na

Universidade de Liège, na Bélgica. É constituído por dois módulos de cálculo distintos: um para a análise do comportamento térmico da estrutura e outro para análise do comportamento mecânico.

1.5. Estrutura da Dissertação

No **capítulo 1** é apresentada uma breve contextualização das estruturas em aço na construção. São abordados alguns dos estudos mais importantes desenvolvidos até ao momento no que diz respeito à encurvadura lateral assim como os principais objetivos pretendidos. Constam ainda neste capítulo todos os casos de estudo que irão ser considerados ao longo do documento.

No **capítulo 2** é feita uma abordagem teórica acerca da encurvadura lateral apresentando também todo o procedimento de cálculo necessário para a determinação do Momento crítico de encurvadura lateral.

O **capítulo 3** encontra-se dividido em dois subcapítulos. No primeiro é feita uma descrição das normas de cálculo existentes e de uma das propostas para a temperatura normal. No segundo são apresentadas as normas de cálculo existentes e são descritas as propostas para temperaturas elevadas a ter em conta no desenvolvimento do documento.

No **capítulo 4** são analisadas as curvas de encurvadura lateral obtidas a partir dos métodos de cálculo especificados no capítulo anterior para cada uma das propostas para temperaturas elevadas apresentando 11 casos de estudo para demonstrar a influência do tipo de carregamento.

Ainda neste capítulo é feito um tratamento estatístico de todos os casos de estudo considerados para o desenvolvimento desta dissertação.

Por fim, no **capítulo 5** são apresentadas três novas situações de carregamento analisadas e comparadas com resultados numéricos obtidos pelo programa de elementos finitos SAFIR.

Capítulo 2

ENCURVADURA LATERAL

2 ENCURVADURA LATERAL

2.1 Conceito

2.2 Momento Crítico

2. ENCURVADURA LATERAL

2.1. Conceito

Quando uma viga é solicitada à flexão sobre o seu maior eixo de rigidez ela pode encurvar e torcer antes de atingir a sua resistência limite. Este fenómeno de instabilidade é cientificamente conhecido e denominado por “Encurvadura Lateral-Torsional”.

A encurvadura lateral verifica-se quando a carga induzida ao elemento cria forças de compressão e tração nas secções. As zonas comprimidas, dado que se encontram desimpedidas de se moverem, desenvolvem forças que provocam um desvio lateral da sua posição original sendo as zonas de fibras tracionadas as responsáveis por tentarem manter o elemento em linha reta. A flexão lateral da secção desenvolve no elemento forças que se opõem ao movimento. Estas forças não são suficientemente grandes para impedir a secção de desviar lateralmente, mas em conjunto com o componente lateral das forças de tração, estas determinam a resistência à deformação do elemento (Franssen, 2000).

Além do movimento lateral as tensões existentes nos banzos comprimidos originam movimentos de torção na secção. A torção é resistida pela rigidez de torção característica do elemento sendo que quando maior for a espessura do banzo, maior será a sua rigidez.

Segundo a teoria da estabilidade de sistemas contínuos (Reis e Camotim, 2001) trata-se de um problema de instabilidade bifurcacional em que a trajetória fundamental corresponde à flexão em torno do eixo de maior inércia (deslocamento w) e o modo de instabilidade envolve, simultaneamente, flexão em torno do eixo de menor inércia (deslocamento v – tendência da zona comprimida) e torção (rotação ϕ – impedimento introduzido pela zona tracionada (Figura 2).

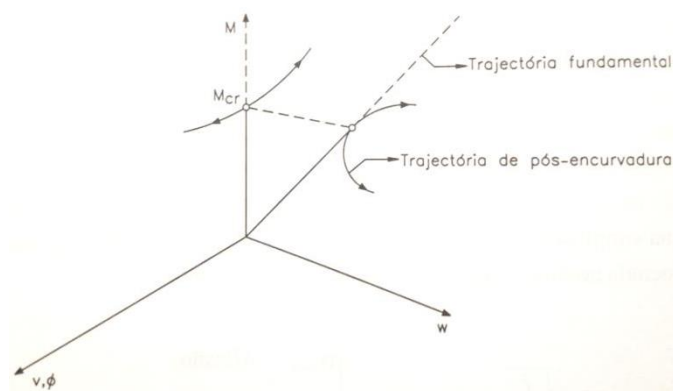


Figura 2 – Instabilidade lateral de vigas – trajetórias de equilíbrio (Reis e Camotim, 2001).

O fenómeno de encurvadura lateral (LTB – Lateral Torsional Buckling) é caracterizado por uma deformação que ocorre na parte comprimida de uma secção (no caso de secções em I - banzo comprimido) de uma viga sujeita a flexão em torno do eixo y (eixo de maior inércia da secção) (Simões, 2007). Assim, a resistência de um elemento fletido não restringido à LTB depende essencialmente da sua esbelteza, que por sua vez depende do momento crítico (Lopes, 2007).

2.2. Momento crítico

O momento crítico de encurvadura é o momento máximo que um elemento (viga) pode suportar sem encurvar lateralmente (Simões, 2007)

Desta forma, a determinação do valor de cálculo do momento resistente à encurvadura lateral depende essencialmente do valor do momento crítico de encurvadura lateral com torção em regime elástico, M_{cr} (CEN, 2005a).

Para a determinação do momento crítico é necessário ter em conta os seguintes fatores:

- Tipo de carregamento (forma do diagrama de momentos fletores);
- Condições de travamento (comprimento da viga onde pode ocorrer instabilidade);
- Localização do ponto de aplicação das cargas transversais (relativamente ao centro de corte da viga);
- Valor da tensão de cedência;
- Rigidez de flexão, torção e empenamento.

A equação geral que permite determinar o momento crítico de encurvadura é análoga à equação de equilíbrio da coluna de Euler em que $\frac{P}{EI}$ é substituído por $\frac{M^2}{GJ EI_z}$. Desta forma tem-se que M_{cr} é dado em função do comprimento do elemento l , da rigidez de flexão EI_z e da rigidez de torção GJ (Reis e Camotim, 2001):

$$M_{cr} = \frac{\pi}{l} \sqrt{GJ EI_z} \quad (1)$$

Segundo alguns autores, (Simões da Silva et al., 2009) e (Bruins, 2007) o modelo vulgarmente considerado para o estudo deste fenómeno, desempenhando o mesmo papel da coluna de Euler na encurvadura de colunas, consiste numa viga simplesmente apoiada em ambas as direcções, com rotação de torção impedida e empenamento permitido nos dois apoios e submetida a um momento flector uniforme (Figura 3) – apoios de forquilha.

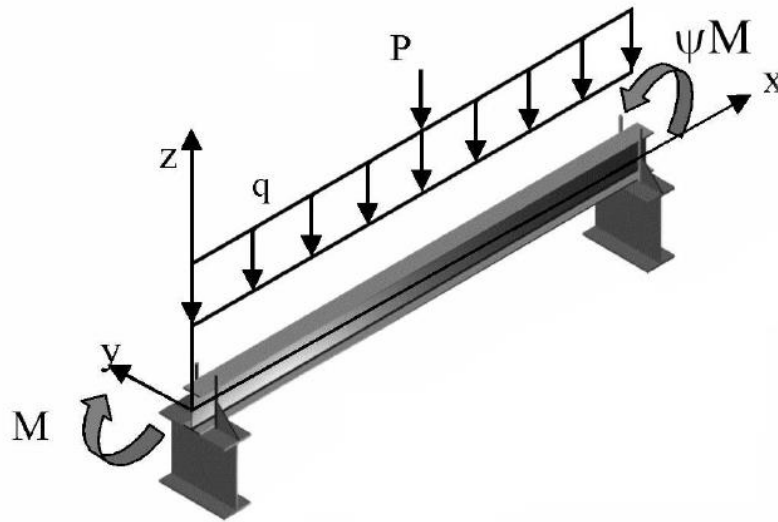


Figura 3- Viga simplesmente apoiada em apoios em “forquilha” (Vila Real et al., 2007a).

No caso de vigas de aço de secção em I (ou H), o cálculo do momento crítico pode ser resultado das equações seguintes tendo como base a configuração deformada apresentada (Figura 4), sendo que (2), (3) e (4) correspondem às equações que representam a configuração deformada em equilíbrio (Reis e Camotim, 2001):

$$EI_y w_{,xx} = -M \quad (2)$$

$$EI_z v_{,xx} = M\phi \quad (3)$$

$$GJ\phi_{,x} - ET\phi_{,xxx} = Mv_{,x'} \quad (4)$$

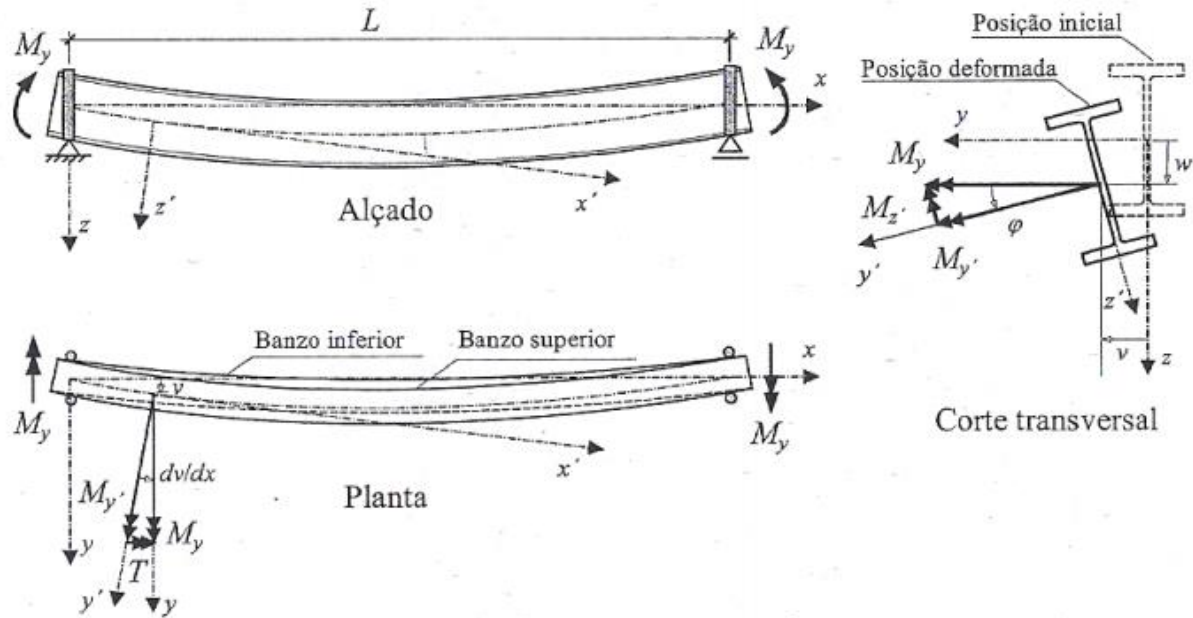


Figura 4- Encurvadura lateral em viga de secção I sujeita a um momento fletor constante (Simões, 2007)

Assim, a expressão considerada “padrão” que permite efetuar o cálculo do momento crítico para uma viga de secção I simplesmente apoiada em ambas as direções, impedida de rodar por torção e empenamento permitido, sujeita a um carregamento uniforme é dada por:

$$M_{cr} = \frac{\pi}{l} \sqrt{EI_z \left(GJ + E\Gamma \frac{\pi^2}{l^2} \right)} \quad (5)$$

Onde l corresponde ao comprimento do elemento, EI_z à rigidez de flexão, GJ à rigidez de torção e $E\Gamma$ a um parâmetro que caracteriza a torção não uniforme.

Atendendo a situações em que a viga seja submetida a outro tipo arbitrário de carregamento, segundo (Reis e Camotim, 2001), o valor de M_{cr} pode ser dado por:

$$M_{cr} \equiv M_{max}(\lambda_{cr}) = C_1 \overline{M_{cr}} = C_1 \frac{\pi}{l} \sqrt{EI_z \left(GJ + E\Gamma \frac{\pi^2}{l^2} \right)} \quad (6)$$

Em que $\overline{M_{cr}}$ define o valor do momento apresentado em (5) e C_1 , que segundo os mesmos autores é designado como “coeficiente de momento uniforme equivalente”, é dado em função da forma final do diagrama de momentos fletores. Para diagramas em que o momento resultante é uniforme o valor de $C_1=1$. Para todos os outros tipos de carregamento este toma sempre valores superiores a 1.

Tendo em conta as extremidades, as condições de apoio de uma viga resumem-se num conjunto de restrições aos deslocamentos generalizados nas secções transversais que se relacionam diretamente com as características dos apoios e das condições de travamento (Nguyen et al., 2013). Desta forma, a resistência de uma viga à instabilidade lateral é influenciada pelas respetivas configurações dos apoios.

Todavia, a presente versão do EC3 não contempla a fórmula a considerar para este cálculo. O cálculo do momento crítico em secções monossimétricas é feito através da equação seguinte:

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(kl)^2} \left[\sqrt{\left(\frac{k}{K_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(kl)^2 GJ_t}{\pi^2 EI_z}} + (C_2 z_g - C_3 z_j)^2 - C_2 z_g + C_3 z_j \right] \quad (7)$$

Sendo que k corresponde à rotação da viga na extremidade do plano e k_w ao empenamento também na extremidade. São considerados como fatores de comprimento eficaz, podendo variar entre 0.5, para fixação completa, 1.0 para elementos sem qualquer fixação e 0.7 para elementos livres numa extremidade e fixos na outra; os valores de inércia de torção I_t e empenamento I_w podem ser fornecidos pelos fabricantes, no caso de perfis metálicos; C_1 , C_2 e C_3 são fatores utilizados tendo em conta o tipo de carregamento e as condições de apoio; os valores de z_g e z_j têm em conta o ponto de aplicação da carga relativamente ao eixo de simetria.

O valor dos coeficientes C_1 e C_2 pode ser determinado a partir de gráficos ou tabelas que são obtidos em função do tipo de carregamento sofrido pelo elemento em estudo (Galéa 2002).

De acordo com o (Galéa, 2002) são utilizadas as expressões seguintes para caracterizar a distribuição de momentos a fim de ser possível a determinação de C_1 :

$$\mu = \frac{qL^2}{8M} \quad (8)$$

$$\mu = \frac{FL^2}{4M} \quad (9)$$

Sendo que a expressão (8) é utilizada para os casos em que o carregamento é dado por uma carga distribuída e a expressão (9) é utilizada para cargas para situações em que são aplicadas carga concentrada (Figura 5).

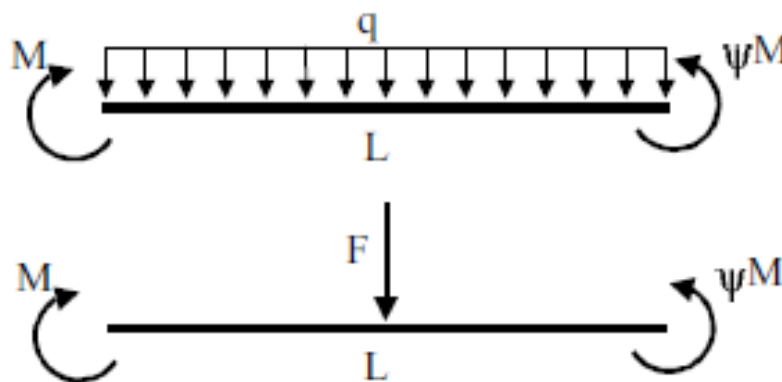


Figura 5 – Situações de carregamento (Galéa, 2002)

Capítulo 3

PROPOSTAS DE DIMENSIONAMENTO

3 PROPOSTAS DE DIMENSIONAMENTO

3.1 Temperatura normal

3.1.1 NP EN 1993-1-1

3.1.1.1 Regras de cálculo

3.1.1.2 Observações

3.1.2 Proposta de alteração ao Eurocódigo 3, parte 1-1

3.1.2.1 Regras de cálculo

3.1.2.2 Observações

3.2 Temperaturas elevadas

3.2.1 NP EN 1993-1-2

3.2.1.1 Regras de cálculo

3.2.2 Nova proposta

3.2.2.1 Fator de imperfeição

3.2.2.2 Influência do tipo de carregamento

3.2.3 Nova proposta – Introdução de uma nova expressão para o fator f

3.2.4 Proposta “AM-1-1-2012-01” adaptada a temperaturas elevadas

3.2.4.1 Regras de cálculo

3.2.4.2 Observações

3. PROPOSTAS DE DIMENSIONAMENTO

3.1. Temperatura normal

Neste capítulo serão apresentadas as regras de cálculo da resistência à encurvadura lateral preconizadas pela Norma Portuguesa do Eurocódigo 3 (CEN, 2005a) e também por uma proposta de alteração da presente norma denominada por “AM-1-1-2012-01” (Taras et al., 2013) para a situação de temperatura normal.

A resistência à encurvadura de elementos uniformes quando solicitados à flexão que não contenham qualquer travamento lateral em relação o seu eixo principal de maior inércia deverão ser verificados através de:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (10)$$

Em que:

M_{Ed} valor de cálculo do momento flector atuante;

$M_{b,Rd}$ valor de cálculo do momento flector resistente à encurvadura.

No caso das vigas cujo banzo comprimido tem um travamento lateral suficiente não são necessárias estas verificações pois estas não estão suscetíveis à encurvadura lateral. Esta situação é também verificada para vigas com certos tipos de secções transversais, como por exemplo: secções tubulares quadradas e circulares, secções circulares soldadas ou secções em caixão quadradas.

3.1.1. NP EN 1993-1-1

3.1.1.1. Regras de cálculo

À temperatura normal o valor de cálculo do momento fletor resistente à encurvadura de uma viga não contraventada lateralmente solicitada à flexão segundo o eixo principal de maior inércia deverá estar de acordo com:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_y \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (11)$$

Onde W_y é o módulo de flexão adequado tendo em conta a classe do tipo de secção transversal em estudo,

$W_y = W_{pl,y}$ para as secções transversais das Classes 1 ou 2;

$W_y = W_{el,y}$ para as secções transversais das Classes 3;

$W_y = W_{eff,y}$ para as secções transversais das Classes 4;

f_y é a tensão de cedência do tipo de aço, γ_{M1} o coeficiente parcial de segurança e χ_{LT} que representa o fator de redução para a resistência à encurvadura lateral e que depende da esbelteza normalizada $\bar{\lambda}_{LT}$ dada por:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}} \quad (12)$$

Sendo M_{cr} o momento crítico elástico para a encurvadura lateral calculado tendo em conta as propriedades da secção transversal bruta, as condições de carregamento, a distribuição real de momentos fletores e ainda os impedimentos laterais. Este é um parâmetro que não se encontra especificado na presente versão do Eurocódigo 3, pode ser consultado na bibliografia (Simões, 2007).

A presente versão da NP EN 1993-1-1 distingue dois métodos para o cálculo do fator de redução χ_{LT} : elementos em flexão com secções transversais constantes e outro para secções laminadas ou soldadas equivalentes (CEN, 2005a).

Para a primeira situação, também denominada por “Caso geral”, o valor de χ_{LT} correspondente à esbelteza normalizada $\bar{\lambda}_{LT}$ é dado por:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \text{ mas } \chi_{LT} \leq 1.0 \quad (13)$$

Onde ϕ_{LT} , valor utilizado para determinar o χ_{LT} , resulta de:

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot [1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2] \quad (14)$$

Em que α_{LT} diz respeito ao fator de imperfeição correspondente à curva de encurvadura apropriada sendo esta a curva representada em função de χ_{LT} e $\bar{\lambda}_{LT}$ (Figura 6). Os valores de α_{LT} são obtidos tendo em conta o tipo de secção transversal e a relação entre altura e a largura do perfil (Tabela 1) aos quais estão associadas diferentes curvas de encurvadura (Tabela 2).

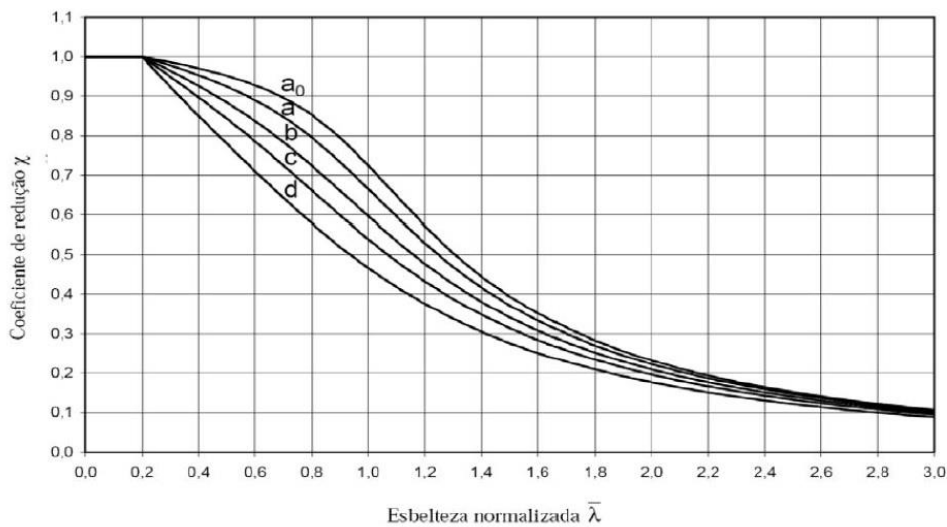


Figura 6 – Curvas de encurvadura apresentadas pela NP EN 1993-1-1 (CEN, 2005a).

Tabela 1 – Curvas de encurvadura lateral recomendadas para secções transversais quando é utilizada a expressão (13) (CEN, 2005a).

Secção Transversal	Limites	Curva de encurvadura
Secções em I laminadas	$h/b \leq 2$	a
	$h/b > 2$	b
Secções em I soldadas	$h/b \leq 2$	c
	$h/b > 2$	d

Tabela 2 – Valores recomendados dos fatores de imperfeição para as curvas de encurvadura lateral segundo NP EN 1993-1-1 (CEN, 2005a).

Curva de encurvadura	a	b	c	d
Fator de imperfeição α_{LT}	0,21	0,34	0,49	0,76

No segundo método, também denominado pelos autores (Vila Real et al., 2007b) por “Caso especial” e que se aplica a secções laminadas ou secções soldadas equivalentes sujeitas à flexão, os valores de χ_{LT} correspondentes a $\bar{\lambda}_{LT}$ poderão ser determinados de acordo com o “Caso geral” sendo que são introduzidos dois novos parâmetros $\bar{\lambda}_{LT,0}$ e β que devem assumir valores máximo de 0.4 e mínimo de 0.75 respetivamente.

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta \bar{\lambda}_{LT}^2}} \text{ mas } \begin{cases} \chi_{LT} \leq 1,0 \\ \chi_{LT} \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \end{cases} \quad (15)$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot [1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \bar{\lambda}_{LT}^2] \quad (16)$$

Assim as curvas de encurvadura lateral recomendadas pela NP EN 1993-1-1 quando é utilizada a expressão (15) são as indicadas na tabela seguinte (Tabela 3) sendo que os valores recomendados de α_{LT} são indicados na Tabela 2.

Tabela 3 - Curvas de encurvadura lateral a utilizar consideradas secções laminadas ou soldadas equivalentes.

Secção Transversal	Limites	Curva de encurvadura
Secções em I ou H laminadas	$h/b \leq 2$	b
	$h/b > 2$	c
Secções em I ou H soldadas	$h/b \leq 2$	c
	$h/b > 2$	d

Adicionalmente ao caso anterior, para ter em conta a distribuição de momentos fletores entre os impedimentos laterais dos elementos, é introduzido um fator f a fim de modificar o χ_{LT} . Desta forma obtém-se o coeficiente de redução modificado $\chi_{LT,mod}$ que é dado por:

$$\chi_{LT,mod} = \frac{\chi_{LT}}{f} \text{ mas } \begin{cases} \chi_{LT,mod} \leq 1,0 \\ \chi_{LT} \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \end{cases} \quad (17)$$

Onde f é determinado a partir de:

$$f = 1 - 0,5(1 - k_c) \left[1 - 2,0(\bar{\lambda}_{LT} - 0,8)^2 \right] \text{ mas } f \leq 1,0 \quad (18)$$

Em que k_c é um fator de correção que depende das condições de carregamento (Tabela 4) e que é calculado utilizando a seguinte expressão:

$$k_c = \frac{1}{\sqrt{C_1}} \quad (19)$$

Sendo C_1 um coeficiente que depende da distribuição de momentos fletores e que pode ser obtido consultando a bibliografia (Galéa, 2002).

Tabela 4 - Fatores de correção k_c .

	Distribuição de momentos	$k_c = \frac{1}{\sqrt{C_1}}$
$\psi=1$		1.00
$\psi=0.5$		0.87
$\psi=0$		0.75
$\psi=-0.5$		0.65
$\psi=-1$		0.62
		0.86
$-M_1$		0.77
$-M_1$		0.82
		0.94
$-M_1$		0.90
$-M_1$		0.91

3.1.1.2. Observações

O anexo nacional da NP EN 1993-1-1 estabelecido em 2010 define que para o método de cálculo referente às secções laminadas ou soldadas equivalente – “Caso especial” – as curvas encurvadura a considerar para o cálculo da resistência à encurvadura lateral são as referentes às do Caso geral e os parâmetros $\bar{\lambda}_{LT,0}$ e β passam a tomar os valores de 0.2 e 1.0, respetivamente.

Desta forma tem-se que para secções laminadas ou soldadas equivalentes, o método a considerar é o Caso geral sendo que a este será adicionada a influência da distribuição de momentos fletores, fator f .

Na Figura 7 encontram-se representadas as curvas obtidas utilizando as equações do caso geral estabelecido na NP EN 1993-1-1 e o caso especial adotado pelo anexo nacional da mesma norma. O perfil considerado é um IPE 500 ($h/b > 2$) de seção laminada de aço do tipo S235 para o tipo de carregamento $\psi = -1$.

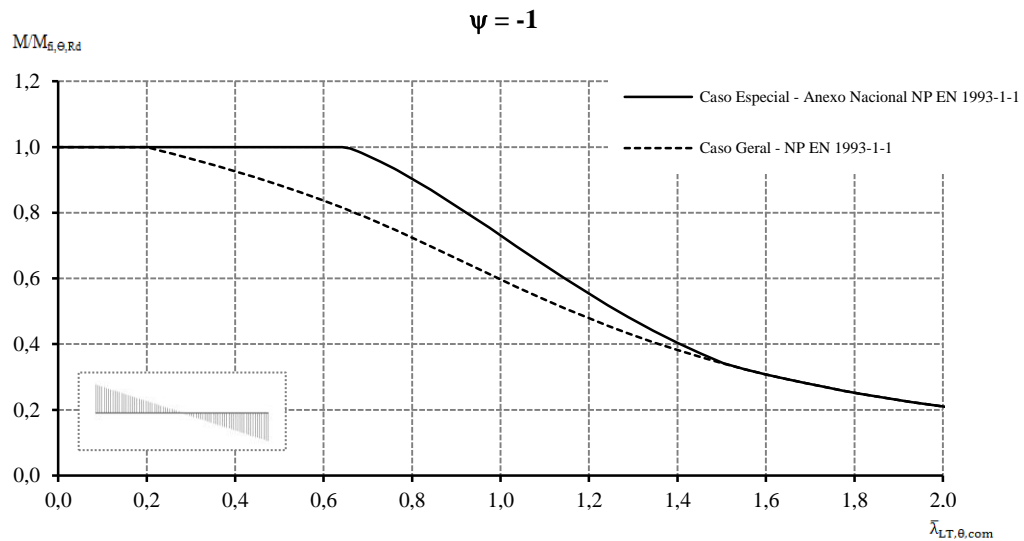


Figura 7 – Influência da consideração da distribuição de momentos fletores no cálculo da resistência à encurvadura lateral à temperatura normal.

3.1.2. Proposta de alteração ao Eurocódigo 3, parte 1-1

A presente proposta é apresentada pela Graz University of Technology (Taras et al., 2013) e foi fundamentada com base numa tese de doutoramento apresentada em 2010 pelo autor Andreas Taras – *Contribution to the Development of Consistent Stability Design Rules of Steel Members*. As fórmulas aqui apresentadas são baseadas na teoria de segunda-ordem e foram calibradas de modo a coincidirem com uma extensa amostra de resultados numéricos tratados no software GMNIA.

Designada neste documento por “AM-1-1-2012-01” tem como principal motivação esclarecer e clarificar várias questões de caráter interpretativo do EN 1993-1-1 e também apresentar novas regras de cálculo a fim de melhorar a aproximação das curvas de encurvadura lateral ao comportamento real dos elementos.

3.1.2.1. Regras de cálculo

O valor de cálculo do momento fletor resistente à encurvadura lateral calcula-se através da equação (11) definida anteriormente.

No caso de secções laminadas ou de secções soldadas equivalentes com comprimento livre entre apoios restringidos é apresentada uma nova expressão para determinar o fator de redução χ_{LT} .

Este fator deve ser determinado a partir da expressão:

$$\chi_{LT} = \frac{f_M}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - f_M \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1,0 \quad (20)$$

Onde

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot \left[1 + f_M \cdot \left(\frac{\bar{\lambda}_{LT}^2}{\bar{\lambda}_z^2} \cdot \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right) \right] \quad (21)$$

Em que $\bar{\lambda}_{LT}$ é a esbelteza para encurvadura lateral igualmente definida pelo EN 1993-1-1 na equação (12), $\bar{\lambda}_z$ é a esbelteza para a encurvadura lateral segundo o eixo z que pode ser determinada a partir de:

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr}}} \quad (22)$$

Sendo A a área da secção e N_{cr} o valor crítico do esforço normal associado ao modo de encurvadura elástica dado por:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI_z}{L^2} \quad (23)$$

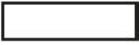



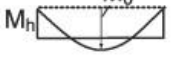

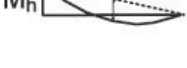

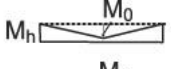



Dado que o EN 1993-1-1 distingue dois métodos de cálculo das curvas de encurvadura lateral e que para cada um deles especifica curvas de encurvadura diferentes, ou seja, fatores de imperfeição diferentes, no caso de secções duplamente simétricas (Tabela 1 e Tabela 3 definidas em 3.1.1.1), os autores (Taras et al., 2013), apresentam em tabela novos valores de α_{LT} que passam a depender também do módulo de flexão elástico (Tabela 5).

Tabela 5 – Fator de imperfeição para secções duplamente simétricas (Taras et al., 2013).

Secção Transversal	Limites	α_{LT}
Secções em I laminadas	$h/b \leq 1.2$	$0.16 \sqrt{W_{el,y}/W_{el,z}} \leq 0.49$
	$h/b > 1.2$	$0.12 \sqrt{W_{el,y}/W_{el,z}} \leq 0.34$
Secções em I soldadas	-	$0.21 \sqrt{W_{el,y}/W_{el,z}} \leq 0.64$

Para ter em conta o efeito da distribuição de momentos fletores entre os apoios restringidos o fator a considerar é f_M (alternativa ao fator f indicado pelo EN 1993-1-1). Segundo os autores este valor deve ser ajustado de forma conservativa ao valor 1.0 para todos os casos em que os diagramas não estejam definidos na Tabela 6:

Tabela 6 – Valores de f_M em função do carregamento (Taras et al., 2013).

Distribuição de momentos	f_M
	1,00
	$1,25 - 0,1 \cdot \psi - 0,15 \cdot \psi^2$
	1,05
	$0,0 \leq \frac{M_0}{M_h} < 2,0 : 1,00 + 1,35 \cdot \frac{M_0}{M_h} - 0,33 \left(\frac{M_0}{M_h} \right)^3$
	$\frac{M_0}{M_h} \geq 2,0 : 1,05$
	$0,0 \leq \frac{M_0}{M_h} < 1,47 : 1,25 + 0,5 \left(\frac{M_0}{M_h} \right)^2 - 0,275 \left(\frac{M_0}{M_h} \right)^4$
	$\frac{M_0}{M_h} \geq 1,47 : 1,05$
	1,10
	$0,0 \leq \frac{M_0}{M_h} < 2,0 : 1,00 + 1,25 \cdot \frac{M_0}{M_h} - 0,30 \left(\frac{M_0}{M_h} \right)^3$
	$\frac{M_0}{M_h} \geq 2,0 : 1,10$
	$0,0 \leq \frac{M_0}{M_h} < 1,50 : 1,25 + 0,325 \left(\frac{M_0}{M_h} \right)^2 - 0,175 \left(\frac{M_0}{M_h} \right)^4$
	$\frac{M_0}{M_h} \geq 1,5 : 1,10$

3.1.2.2. Observações

Para mostrar o desempenho de cada uma das curvas foram utilizados dois perfis de secção laminada – HEA 500 (em representação do limite $h/b < 1.2$) e IPE 500 (em representação do limite $h/b > 1.2$) – e um perfil de secção soldada – IPE 500 do tipo de aço S235 para uma situação de carregamento mais desfavorável ($\psi = -1$).

Feita a comparação entre o método estabelecido pelo presente EN 1993-1-1 e o método proposto em AM-1-1-2012-01 verifica-se que a curva de encurvadura obtida pelo segundo método se encontra, para as situações (Figura 8 e Figura 9), ligeiramente acima da curva do primeiro método para valores de esbelteza compreendidos entre 1.0 e 2.0 (Figura 8) e entre 0.5 e 2.0 (Figura 9). Contudo, para a situação em que a secção é soldada (Figura 10) a curva obtida pelo segundo método apresenta um patamar de segurança que vai até $\bar{\lambda} = 0.7$ sendo este valor superior ao obtido pela curva do EN 1993-1-1 que atinge o valor de $\bar{\lambda} \approx 0.4$.

Deste modo, tendo em conta os exemplos aqui apresentados constata-se que a proposta AM-1-1-2012-01 exhibe para as três situações uma gama de valores de resistência à encurvadura ligeiramente superiores ao Eurocódigo 3, parte 1-1.

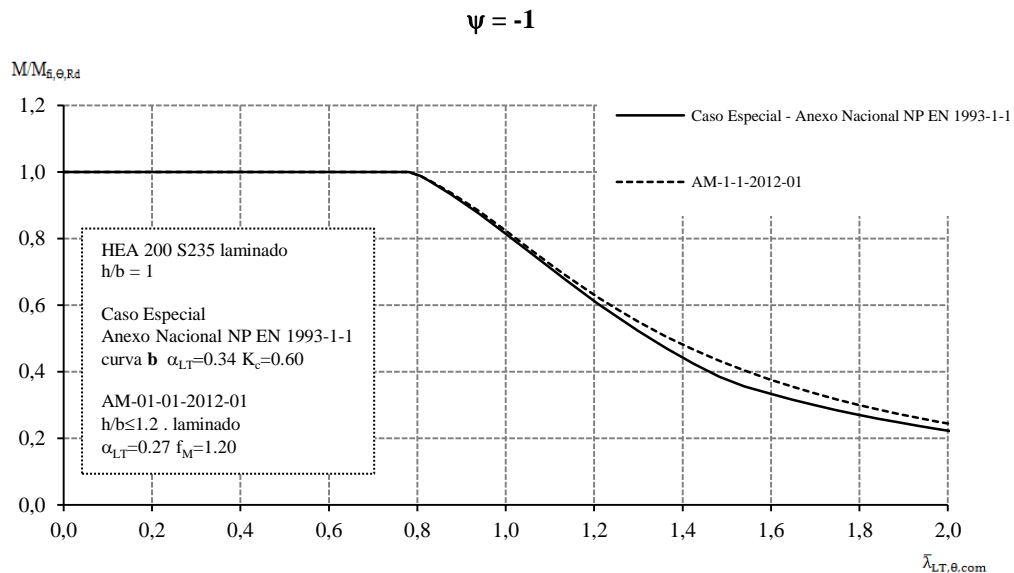


Figura 8 – HEB 200 Laminado ($h/b < 1.2$).

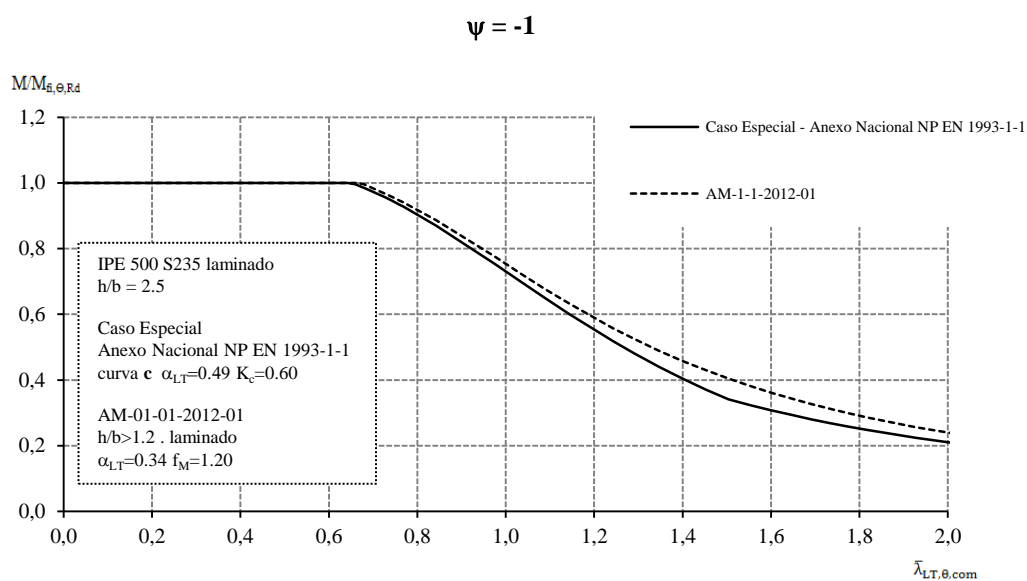


Figura 9 – IPE 500 S235 Laminado ($h/b > 1.2$).

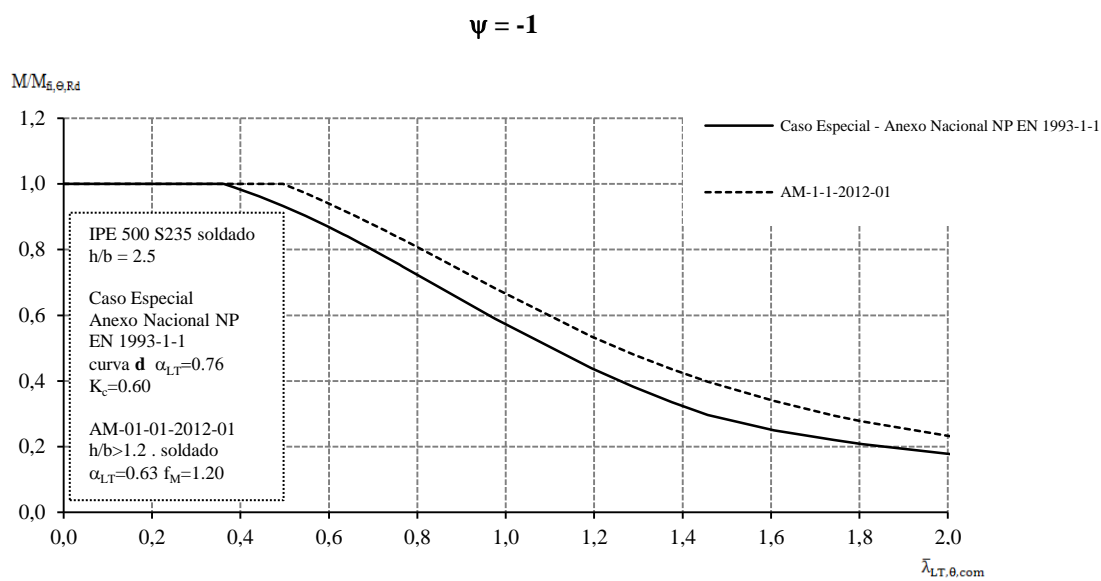


Figura 10 – IPE 500 S235 Soldado.

3.2. Temperaturas elevadas

Neste capítulo serão abordadas regras de cálculo da resistência à encurvadura lateral em situação de incêndio. Serão tidos em consideração elementos de viga em aço de secção transversal de classe 1 ou 2, restringidos nos apoios e desimpedidos lateralmente, com uma distribuição uniforme de temperatura.

A Norma Portuguesa do Eurocódigo 3, parte 1-2, servirá de principal motivação para elaboração deste documento dado que tem sido alvo de vários estudos (Vila Real e Franssen, 1999; Vila Real et al., 2003) nos últimos anos que comprovam que as curvas de encurvadura obtidas através das regras de cálculo por ela estabelecidas se encontram demasiado conservativas quando comparadas com o verdadeiro comportamento do elemento em situação de incêndio.

Analizando as duas situações, temperatura normal e temperatura em situação de incêndio, é possível constatar que são tidos em conta diferentes parâmetros em cada uma das partes do Eurocódigo 3. Enquanto que a parte 1-1 tem em conta o efeito das tensões residuais, imperfeições geométricas e fundamentalmente o tipo de carregamento, a parte 1-2 apresenta apenas a influência do tipo de aço na resistência à encurvadura lateral para elevadas temperaturas.

Por esta razão, serão aqui apresentadas e especificadas três propostas alternativas ao EN 1993-1-2 com o objetivo de estabelecer novas curvas de encurvadura que, quando comparadas com resultados numéricos, se encontrem em segurança e próximas do comportamento real das secções em estudo.

A primeira proposta, denominada por “Nova Proposta”, foi elaborada pelos autores (Vila Real et al., 2007b) com o objetivo de demonstrar que a consideração dos vários fatores, atrás mencionados, faz aproximar as curvas, de forma significativa, do comportamento real em situação de incêndio.

A segunda proposta é uma adaptação da “Nova Proposta” dado que a expressão que contempla o efeito da distribuição de momentos será o único parâmetro a alterar e terá como designação “Nova proposta – adaptada”.

Por fim será desenvolvida uma nova versão da proposta AM-1-1-2012-01 (Taras et al., 2013) desta vez adaptada para altas temperaturas. As regras de cálculo não serão alteradas, apenas as expressões da esbelteza serão afetadas do fator de redução da tensão

de cedência efetiva e do fator de redução para a inclinação da reta que representa o domínio elástico correspondentes às temperaturas consideradas.

3.2.1. NP EN 1993-1-2

O presente documento preconiza um método de cálculo da resistência à encurvadura lateral idêntico ao referido na parte 1-1 do Eurocódigo 3 de forma mais simplificada para a situação de incêndio (CEN, 2005b).

3.2.1.1. Regras de Cálculo

De acordo com o EN 1993-1-2, o valor do momento resistente à encurvadura lateral de um elemento não restringido lateralmente com uma secção transversal da Classe 1, 2 ou 3, deverá ser determinado a partir de:

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT,fi} W_y k_{y,\theta} f_y \frac{1}{\gamma_{M,fi}} \quad (24)$$

Onde W_y é o módulo de flexão adequado tendo em conta a classe do tipo de secção transversal em estudo

$W_y = W_{pl,y}$ módulo de flexão plástico para secções transversais de Classe 1 e 2;

$W_y = W_{el,y}$ módulo de flexão elástico para secções transversais de Classe 3;

$k_{y,\theta}$ representa o fator de redução de tensão de cedência do aço à temperatura θ e $\chi_{LT,fi}$ é o fator de redução para a encurvadura lateral em situação de incêndio formalmente baseado na formula de Ayrton-Perry (Ayrton et al., 1886; Maquoi, 1978) que é dado por:

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\phi_{LT,\theta} + \sqrt{[\phi_{LT,\theta}]^2 - [\bar{\lambda}_{LT,\theta}]^2}} \quad (25)$$

Com

$$\phi_{LT,\theta} = \frac{1}{2} \cdot [1 + \alpha_{LT} \bar{\lambda}_{LT,\theta} + (\bar{\lambda}_{LT,\theta})^2] \quad (26)$$

A esbelteza normalizada $\bar{\lambda}_{LT,\theta}$ é dada por:

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta} = \bar{\lambda}_{LT} \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} \quad (27)$$

Onde $k_{E,\theta}$ é o fator de redução para a inclinação da reta que representa o domínio elástico à temperatura θ e $\bar{\lambda}_{LT}$ a esbelteza normalizada para a encurvadura lateral à temperatura normal que é calculada através da equação (12) definida em 3.1.1.1.

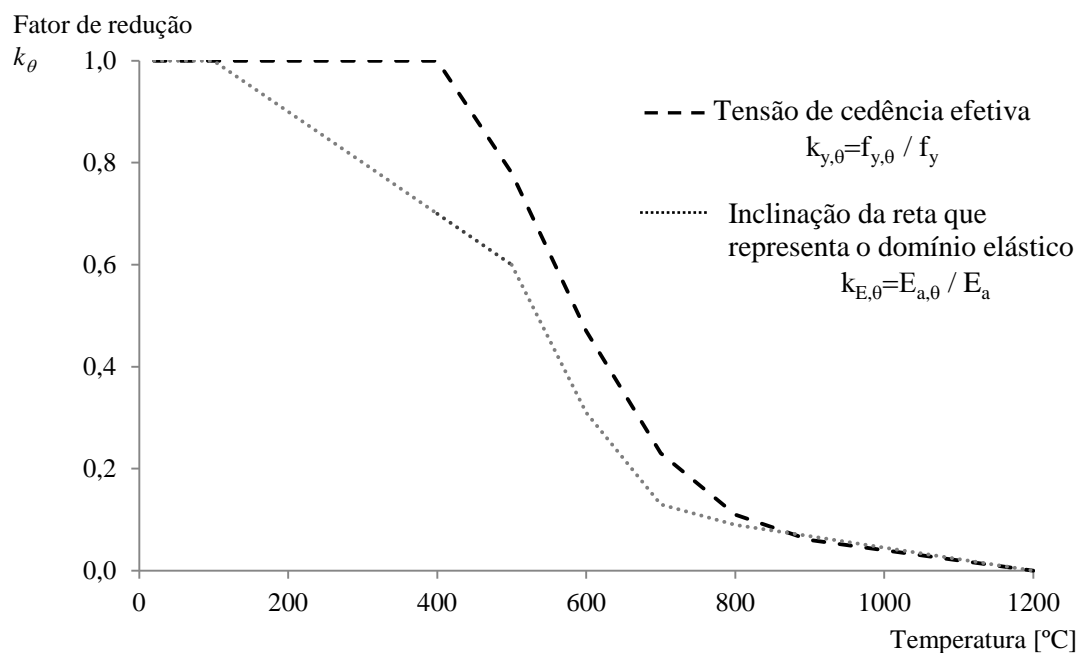
O fator de imperfeição α_{LT} , proposto por (Vila Real et al., 2003), é dado em função do tipo de aço:

$$\alpha_{LT} = 0,65 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (28)$$

Os fatores de redução $k_{y,\theta}$ para a tensão de cedência efetiva e $k_{E,\theta}$ para a inclinação da reta que representa o domínio elástico apresentam-se na tabela seguinte. A Figura 11 apresenta um gráfico que estabelece a relação entre o fator de redução e a temperatura. Apenas as temperaturas referidas neste documento se encontram exibidas na Tabela 7.

Tabela 7 – Fatores de redução para a relação tensões-extensões do aço carbono a temperaturas elevadas (CEN, 2005b).

Fatores de redução à temperatura θ_a referidos ao valor f_y ou E_a a 20°C		
Temperatura do aço θ_a	Fator de redução para a tensão de cedência efetiva $K_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y$	Fator de redução para a inclinação da reta que representa o domínio elástico $K_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a$
20°C	1.000	1.000
400°C	1.000	0.700
500°C	0.780	0.600
600°C	0.470	0.310
700°C	0.230	0.130

**Figura 11** - Fatores de redução para a relação tensões-extensões do aço carbono a temperaturas elevadas.

3.2.1.2. Observações

Segundo os autores (Vila Real et al., 2004a) a influência do tipo de aço, da geometria da secção transversal e do efeito das tensões residuais não é notável quando considerados separadamente. Quando estes três efeitos atuam em simultâneo, a curva resultante da presente equação do Eurodigo 3, parte 1-2 encontra-se acima dos limites de segurança (Figura 12) quando comparada com resultados numéricos. Assim, um novo fator de imperfeição α será especificado a fim de conjugar o comportamento esperado da atuação em simultâneo desses parâmetros.

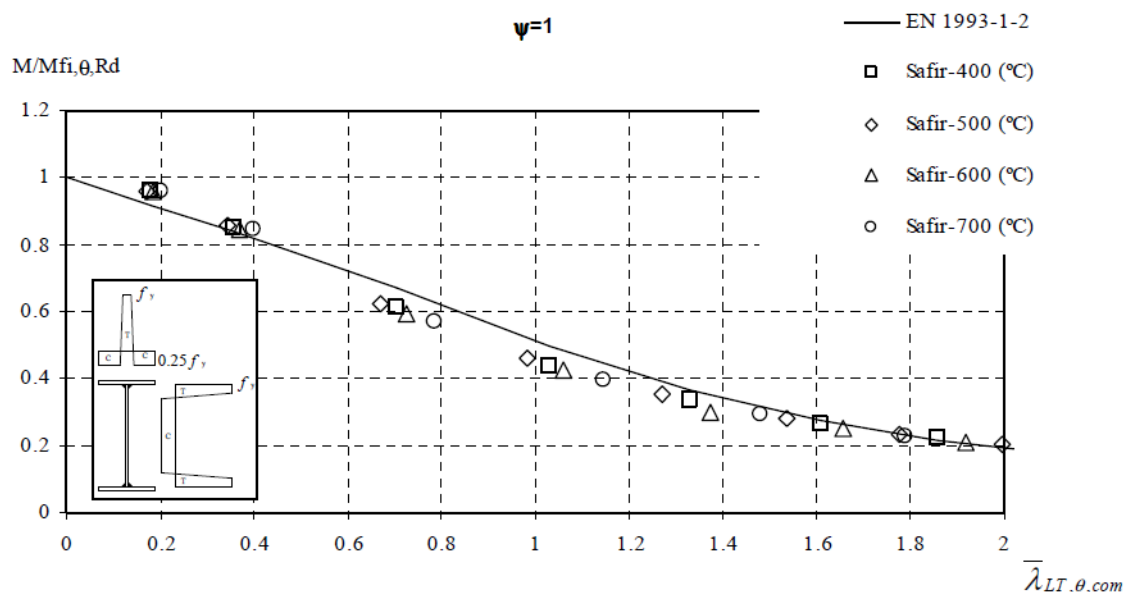


Figura 12- Resultado dos efeitos: tensões residuais, imperfeições geométricas e tipo de aço a atuar em simultâneo comparado com a curva obtida pela equação do Eurocódigo 3, parte 1-2 (Vila Real et al., 2004a).

3.2.2. Nova Proposta

A proposta aqui documentada tem como base o documento desenvolvido por (Vila Real et al., 2007b) com o objetivo de corrigir as curvas adotadas pelo EN 1993-1-2 no domínio da resistência à encurvadura lateral.

É apresentada nesta proposta uma expressão que permite avaliar a resistência à encurvadura lateral tendo em conta o efeito da distribuição de momentos fletores não uniformes, que contrariamente ao EN 1993-1-2 não se encontra definido pela norma.

As expressões da esbelteza normalizada $\bar{\lambda}_{LT,\theta}$, do $\phi_{LT,\theta}$ e do fator de redução $\chi_{LT,fi}$ mantêm-se inalteradas comparativamente à parte 1-2 do Eurocódigo 3, ou seja, são determinadas a partir das equações (27), (26) e (25) respetivamente.

3.2.2.1. Fator de imperfeição

A fim de ser estabelecido um valor que defina a atuação simultânea do efeito das tensões residuais, imperfeições geométricas para diferentes tipos de aço, os autores propõem que a equação que define o fator de imperfeição α seja dada em função de um factor β :

$$\alpha = \beta \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (29)$$

Tomando β os valores referidos na tabela seguinte (Tabela 8)

Tabela 8 - Valores de β obtidos pelos autores (Vila Real et al., 2007a).

SECÇÃO TRANVERSAL	LIMITES	β	
		S235, S275, S355, S420	S460
Secção em I Laminada	$h/b \leq 2$	0,65	0,70
	$h/b > 2$	0,75	0,80
Secção em I Soldada	$h/b \leq 2$	0,70	0,75
	$h/b > 2$	0,80	0,85
Outras Secções Transversais	-	0,80	0,85

A Figura 13 exemplifica as curvas obtidas pelo método especificado pela Nova Proposta e pelo método da parte 1-2 do Eurocódigo 3. Foi escolhido um IPE 500 (em representação razão $h/b > 2$) de secção soldada de aço do tipo S 460 com a finalidade de analisar a caso mais desfavorável para uma situação de $\psi=1$.

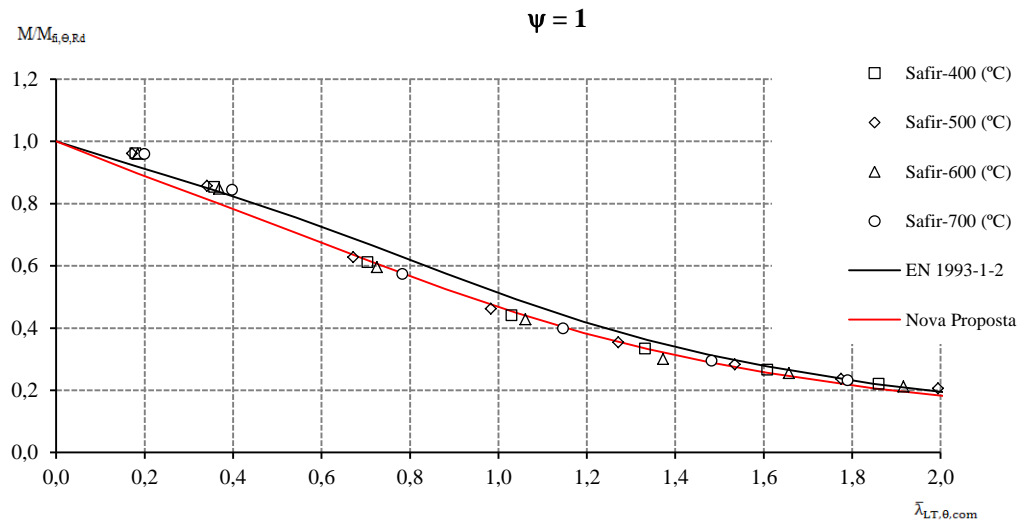


Figura 13 – IPE 500 de seção soldada de aço do tipo S 460.

3.2.2.2. Influência do tipo de carregamento - Fator f

Para ter em conta o efeito da distribuição de momentos fletores entre os travamentos laterais dos elementos o fator de redução $\chi_{LT,fi}$ deve ser modificado da seguinte forma:

$$\chi_{TL,fi,mod} = \frac{\chi_{LT,fi}}{f} \text{ mas } \chi_{TL,fi,mod} \leq 1 \quad (30)$$

Onde f depende do tipo de carregamento adotado.

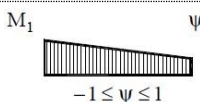






Numa fase inicial da formulação da proposta, foi estudado pelos autores (Vila Real et al., 2004b) a influência da consideração da expressão de f (18), referida no EN 1993-1-1, na equação do fator de redução modificado. Todavia os resultados obtidos, embora resultassem numa aproximação melhorada da curva de encurvadura aos valores numéricos, esses ainda continuavam demasiado conservativos (curva denominada por “EN 1993-1-2/ f ” na Figura 15). Consequentemente, de modo a obter uma maior aproximação, os valores de f e k_c foram ajustados e calibrados de forma a coincidirem, o mais próximo possível, com os valores numéricos obtidos pelo SAFIR.

Assim sendo, é apresentada uma nova expressão para ter em conta a distribuição de momentos fletores entre apoios restringidos dada por:

$$f = 1 - 0,5(1 - k_c) \quad (31)$$

Onde k_c é um fator de correção que é obtido em função do tipo de carregamento em escolhido. Este fator foi calibrado unicamente para as situações em que o carregamento se encontra especificado na tabela seguinte (Tabela 9) de secções de classe 1,2 e 3:

Tabela 9 – Fatores de correção k_c para a nova proposta (Vila Real et al., 2007b).

Distribuição de momentos	Secções de classes 1, 2 ou 3 k_c
	$0,6 + 0,3\psi + 0,15\psi^2$ mas $k_c \leq 1$
	0,91
	0,90
	0,91
	0,79
	0,73
	0,75
Nota: para os diagramas restantes, $k_c = 1$	

Na Figura 14 estão representadas as curvas de encurvadura obtidas utilizando o método de cálculo descrito na Nova Proposta para diferentes diagramas de momentos fletores.

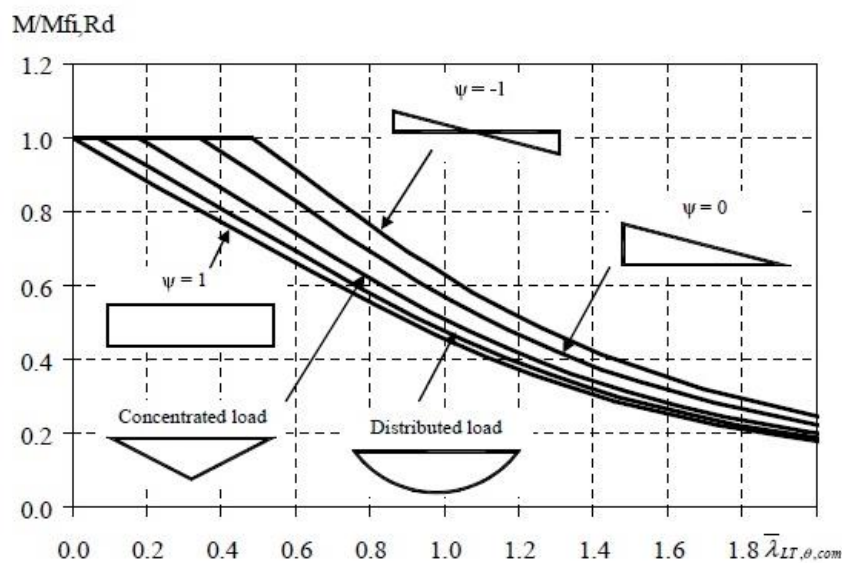


Figura 14- Nova proposta para diferentes diagramas de momentos (Vila Real et al., 2007b).

A Figura 15 compara a utilização do fator f , equação (18), adaptado à parte 1-2 do Eurocódigo 3 com a proposta aqui apresentada aos resultados numéricos obtidos pelo programa.

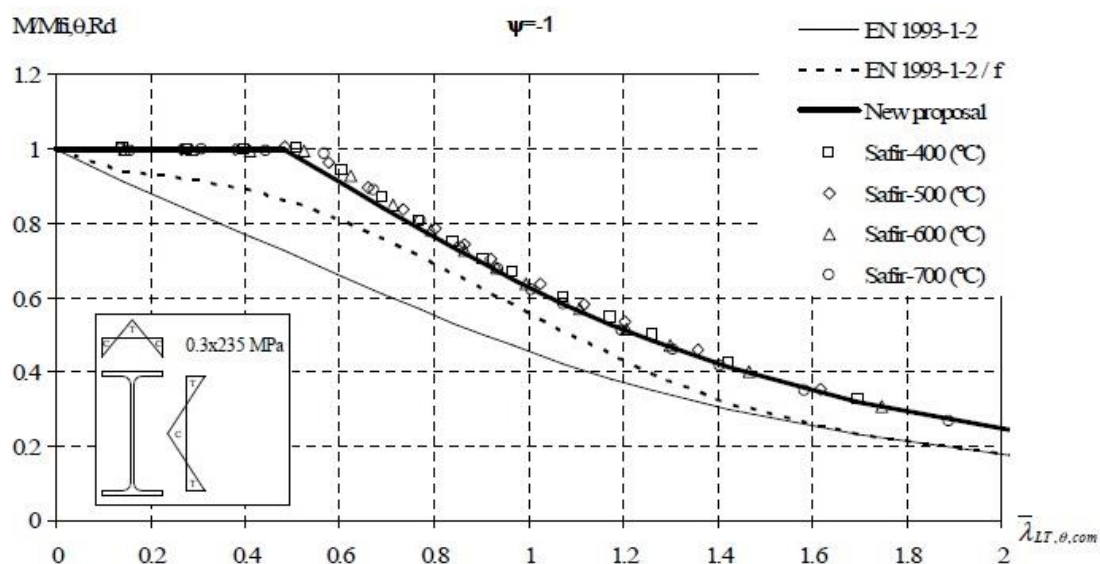


Figura 15 – Comparação entre a EN 1993-1-2, a Nova Proposta e resultados numéricos (Vila Real et al., 2007b).

3.2.3. Nova Proposta – Introdução de uma nova expressão para o fator f

Dado que a proposta anterior foi estudada e adaptada apenas para as situações de carregamento acima mencionadas (Tabela 9), o autor (Vila Real e Lopes, 2013) com principal objetivo de adaptar a influência do tipo de carregamento dada pela expressão de f a um qualquer tipo de carregamento possível de ser tido em conta, desenvolveu uma nova expressão que permite ter em conta o efeito da distribuição de momentos não uniforme obtendo assim valores de resistência mais próximos do comportamento real em situação de incêndio sem que seja necessária a calibração de valores aos resultados numéricos para qualquer situação pretendida.

Assim sendo é apresentada uma nova expressão de f dada por:

$$f = 1 - 0,65(1 - k_c) \quad (32)$$

Onde k_c passa a assumir o mesmo valor dado pela parte 1-1 do Eurocódigo 3 (Tabela 4 definida em 3.1.1.1)











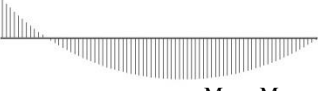
$$k_c = \frac{1}{\sqrt{C_1}} \quad (33)$$

Sendo o valor C_1 obtido por consulta das tabelas pertencentes ao Anexo Nacional Francês disponíveis em (Galéa, 2002).

A Figura 16 permite perceber a diferença entre as curvas de encurvadura obtidas pelo método apresentado em Nova Proposta utilizando as duas expressões de f acima referidas.

A Tabela 10 apresenta os valores obtidos pelas expressões (31) e (32) para a proposta definida em 3.2.2 e pela versão adaptada definida na presente secção.

Tabela 10 – Valores de f atribuído a cada carregamento para cada uma das expressões consideradas (31) e (32), respetivamente.

	Distribuição de momentos	f	
		(31)	(32)
$\psi=1$		1.00	1.00
$\psi=0.5$		0.89	0.92
$\psi=0$		0.80	0.84
$\psi=-0.5$		0.74	0.77
$\psi=-1$		0.73	0.75
		0.90	0.91
$-M_1$		0.87	0.85
$-M_1$		0.88	0.88
		0.96	0.96
$-M_1$		0.95	0.95
$-M_1$		0.96	0.94

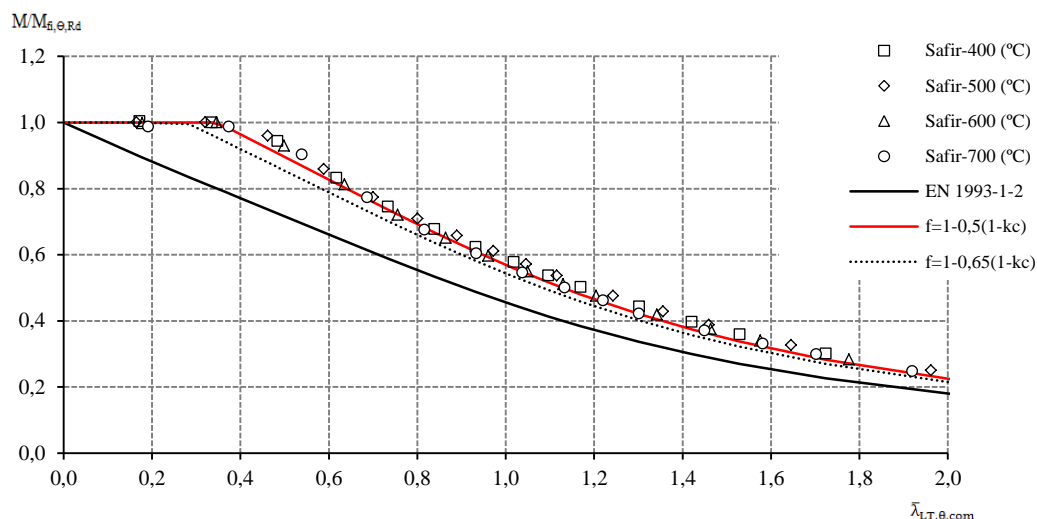


Figura 16 – Comparação feita entre os métodos apresentados em Nova Proposta, Nova Proposta adaptada de um novo fator f , parte 1-2 do Eurocódigo e resultados numéricos SAFIR.

3.2.4. Proposta “AM-1-1-2012-01” adaptada a temperaturas elevadas

A proposta aqui apresentada tem como objetivo adaptar para altas temperaturas as regras de cálculo apresentadas anteriormente em AM-1-1-2012-01.

Será feita uma primeira abordagem onde todas as expressões e valores tabelados, à exceção das expressões utilizadas no cálculo das esbeltezas, se manterão de acordo com o especificado para o método referido para a temperatura normal.

Na segunda abordagem, para além das alterações acima mencionadas, será tida em consideração também a adoção de um fator de imperfeição α_{LT} igual ao que atualmente se encontra especificado na Norma Portuguesa do EN 1993-1-2.

3.2.4.1. Regras de Cálculo

O valor de cálculo do momento fletor resistente à encurvadura lateral calcula-se através da equação (24) apresentada em 3.2.1.1.

O fator de redução $\chi_{LT,fi}$ será obtido recorrendo à expressão dada por:

$$\chi_{LT,fi} = \frac{f_M}{\phi_{LT,\theta} + \sqrt{\phi_{LT,\theta}^2 - f_M \cdot \bar{\lambda}_{LT,\theta}^2}} \leq 1,0 \quad (34)$$

Onde

$$\phi_{LT,\theta} = 0,5 \cdot \left[1 + f_M \cdot \left(\frac{\bar{\lambda}_{LT,\theta}^2}{\bar{\lambda}_{z,\theta}^2} \cdot \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{z,\theta} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT,\theta}^2 \right) \right] \quad (35)$$

Em que a esbelteza normalizada para encurvadura lateral modificada para temperaturas elevadas $\bar{\lambda}_{LT,\theta}$ é calculada através da expressão (27) definida em 3.2.1.1 e a esbelteza normalizada segundo o eixo z modificada, também para elevadas temperaturas $\bar{\lambda}_{z,\theta}$ dada pela expressão:

$$\bar{\lambda}_{z,\theta} = \bar{\lambda}_z \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} \quad (36)$$

O fator de imperfeição α_{LT} e o efeito da distribuição de momentos fletores, designado por fator f_M para o tipo de carregamento em estudo, serão obtidos a partir da Tabela 5 e Tabela 6 definidas em 3.1.2.1, respetivamente.

3.2.4.2. Observações

Na figura seguinte é possível constatar que a curva de encurvadura obtida pelo método adotado na primeira abordagem (denominada por “AM-1-1-2012-01”) se encontra largamente afastada da curva obtida pelo método existente na atual Norma Portuguesa EN 1993-1-2. Recorreu-se como exemplo a um perfil IPE 220 de secção laminada de aço do tipo S 235 para uma situação de carregamento de $\psi = 1$.

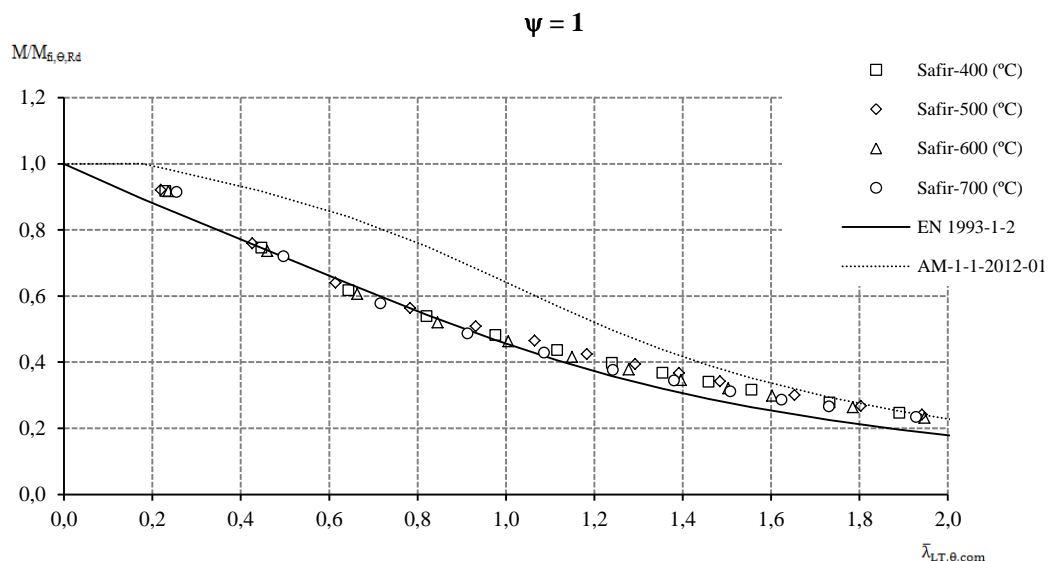


Figura 17 – Comparação entre o método preconizado pelo EN 1993-1-2 e pela primeira abordagem feita à proposta AM-1-1-2012-01 a elevadas temperaturas.

Por este motivo e dado que, segundo os autores (Vila Real e Lopes, 2013) a presente norma EN 1993-1-2 não sofrerá quaisquer alterações quanto à expressão que define o fator de imperfeição α_{LT} , é feita uma segunda abordagem cujo fator de imperfeição passa a ser definido pela atual expressão preconizada pela parte 1-2 do Eurocódigo 3 que se encontra em 3.1.2.1 dada pela expressão (28).

Desta forma, recorrendo ao exemplo anterior, a Figura 18 apresenta a diferença entre a primeira e a segunda abordagem (denominada por “AM-1-1-2012-01_{adaptado}”) comparativamente ao EN 1993-1-2. Constatase que a segunda abordagem embora ligeiramente acima da curva preconizada pelo Eurocódigo 3 não apresenta uma discrepância tão exagerada de valores de resistência à encurvadura lateral como a obtida pela primeira abordagem.

Assim sendo, para analisar as propostas apresentadas e a parte 1-2 do Eurocódigo 3 optou-se por utilizar a segunda abordagem como representação da proposta AM-1-1-2012.

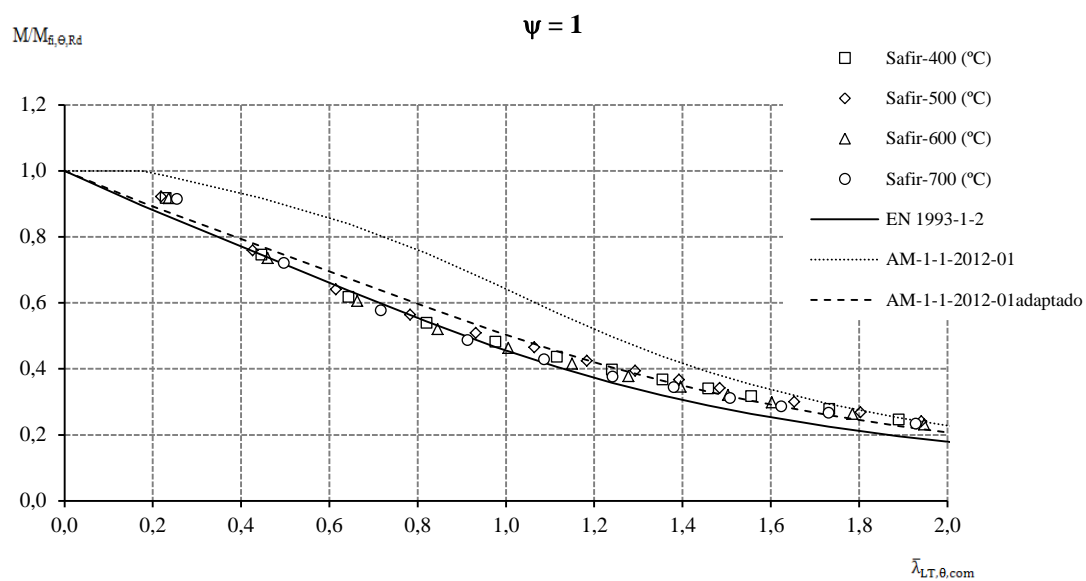


Figura 18 – Comparação das curvas obtidas pelas duas abordagens com a curva da parte 1-2 do EC3.

Capítulo 4

ANÁLISE DA PRECISÃO DAS PROPOSTAS

4 ANÁLISE DA PRECISÃO DAS PROPOSTAS

4.1 Fator de imperfeição

4.1.1 Influência do tipo de aço

4.1.2 Influência da esbelteza da secção

4.1.3 Influência das tensões residuais

4.1.4 Observações

4.2 Influência do tipo de carregamento

4.2.1 Casos de estudo

4.2.2 Curvas de encurvadura

4.3 Estatística

4.3.1 Método de análise

4.3.2 Observações

4. ANÁLISE DA PRECISÃO DAS PROPOSTAS

Nesta secção serão comparados a resultados numéricos aos diferentes métodos anteriormente mencionados para o cálculo da resistência à encurvadura lateral em situação de incêndio (400, 500, 600, e 700 °C).

Será feita uma primeira análise que compara a curva obtida pelo método do EN 1993-1-2 com os resultados numéricos obtidos pelo SAFIR, para a situação de carregamento $\psi = 1$, tendo em conta o efeito dos vários fatores que contribuem para este tipo de instabilidade com o objetivo de demonstrar a importância que tem a sua consideração.

Numa segunda análise, serão apresentadas onze situações de carregamento onde a principal motivação deste documento pretende ser demonstrada: perceber a importância de ter em conta a distribuição de momentos ao longo da viga no cálculo da resistência à encurvadura lateral em situação de incêndio.

4.1. Fator de imperfeição

4.1.1. Influência do tipo de aço

Para mostrar a influência do tipo de aço foi escolhido um perfil IPE 500 de secção laminada considerando uma situação em que a distribuição de momentos é uniforme ($\psi=1$) ao longo da viga para os tipos de aço: S235, S355 e S460. Os valores do fator de imperfeição α_{LT} dado pela parte 1-2 do Eurocódigo 3 para os diferentes tipos de aço apresentam-se na Tabela 11.

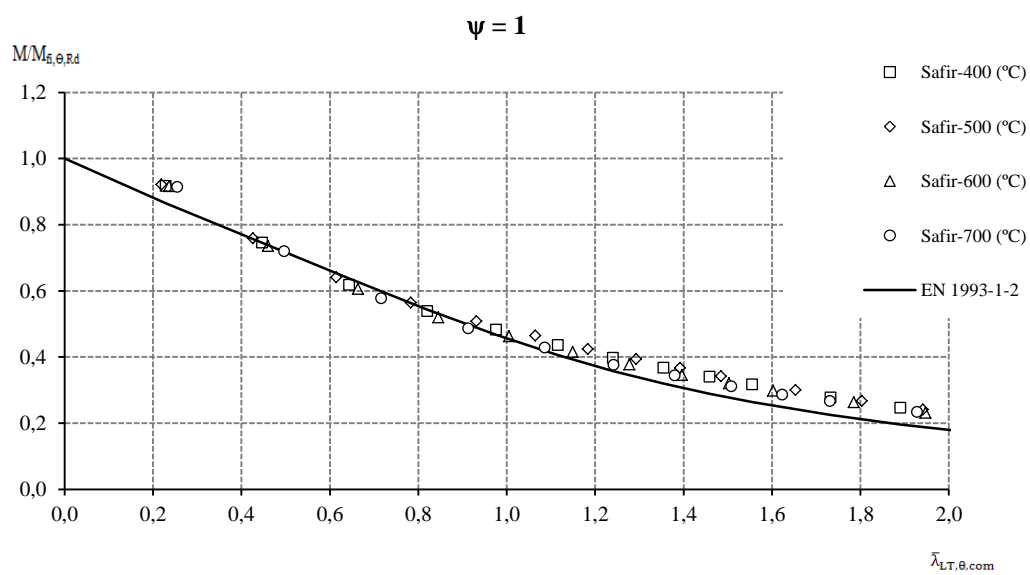
As curvas obtidas pelo EN 1993-1-2 são comparadas com resultados numéricos de resistência à encurvadura lateral para as temperaturas (400°, 500°, 600° e 700 °C) obtidos pelo programa SAFIR.

Verifica-se que a curva obtida pelo EN 1993-1-2 (Figura 19) para as situações de S235 e S355 apresenta-se muito próxima dos valores numéricos.

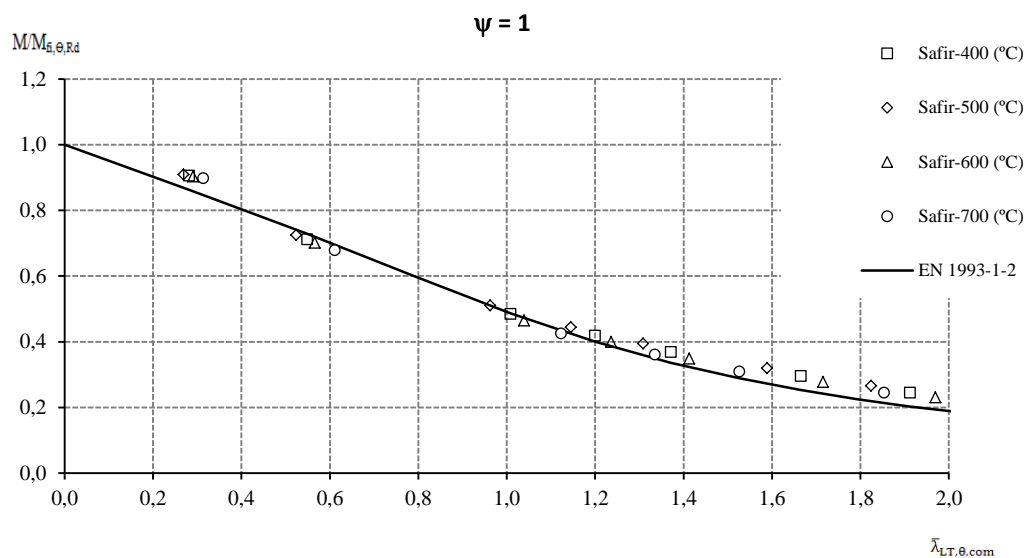
Contudo, para situação em que o aço é do tipo S460 a curva deveria sofrer uma ligeira descida de forma a que, para valores de esbelteza entre 0.6 e 1.0, não assumisse valores acima dos obtidos numericamente.

Tabela 11 – Fatores de imperfeição segundo o EN 1993-1-2.

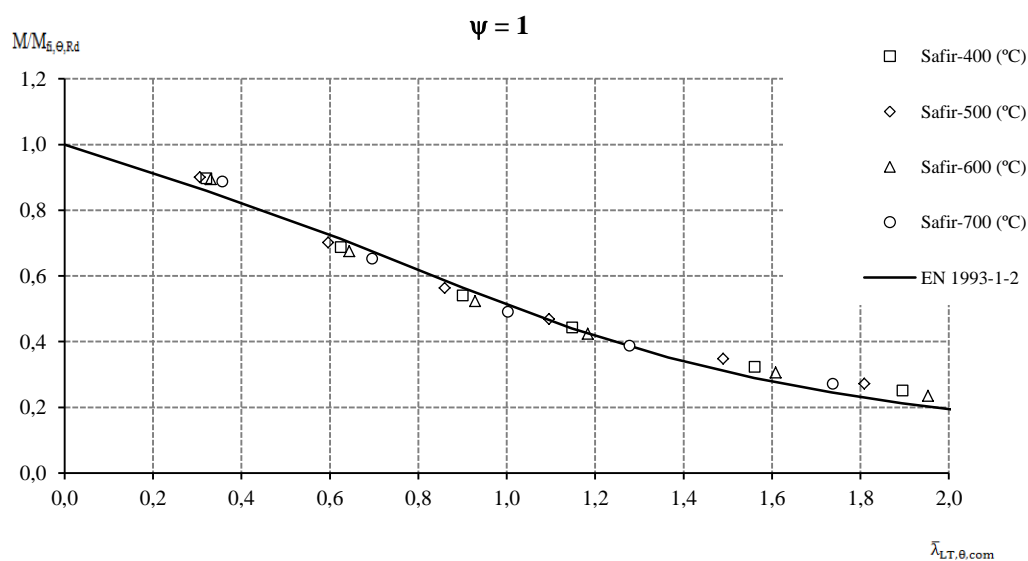
Fator de Imperfeição	Tipo de Aço		
	S 235	S 355	S 460
$\alpha_{LT} = 0.65 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$	0.65	0.53	0.46



a) S235



b) S355



c) S460

Figura 19 – Influência do tipo de aço nas curvas de encurvadura lateral: a) S235, b) S355 e c) S460.

4.1.2. Influência da esbelteza da secção

Para analisar a influência do tipo de secção transversal, utilizaram-se três secções distintas: HEB 500 representando o limite de h/b inferior a dois, IPE 220 representando o limite de h/b igual a dois e o IPE 500 representando o limite de h/b superior a dois.

As figuras seguintes (Figura 20, Figura 21 e Figura 22) comparam os valores obtidos numericamente para as três secções de aço do tipo S235 para a situação de carregamento $\psi = 1$.

Analisando as figuras seguintes é possível verificar que à medida que aumenta a razão h/b a curva preconizada pelo EN 1993-1-2 deveria tomar valores inferiores, a fim de se aproximar mais dos resultados numéricos mantendo-se em segurança.

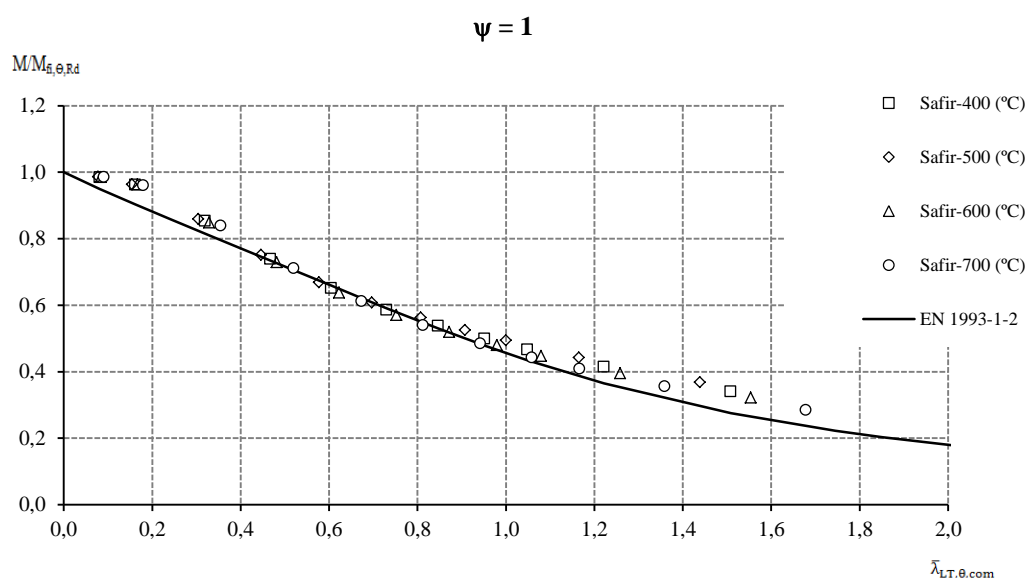


Figura 20 – HEB 500 S235 Laminado ($h/b < 2$).

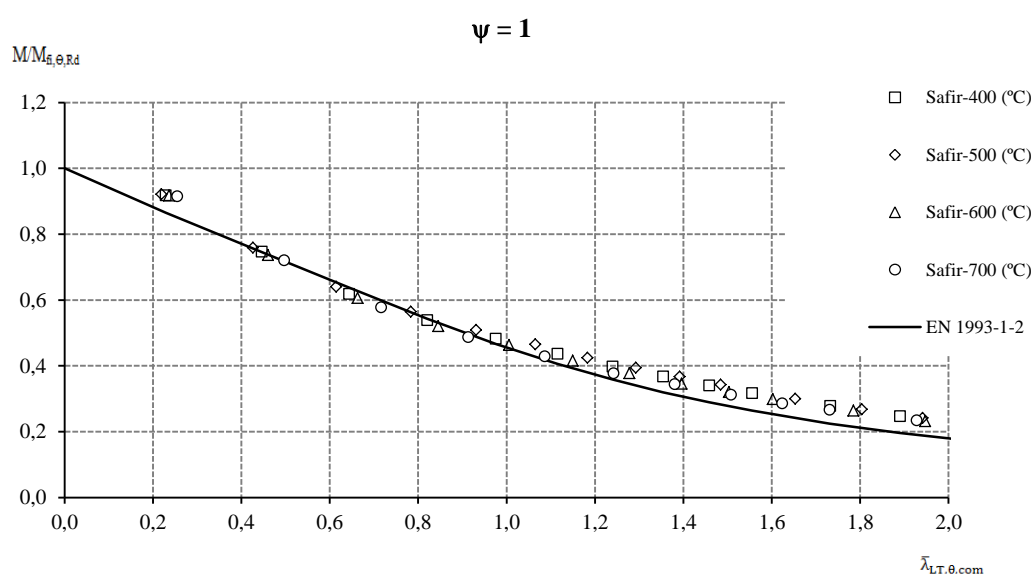


Figura 21 – IPE 220 S235 Laminado ($h/b = 2$).

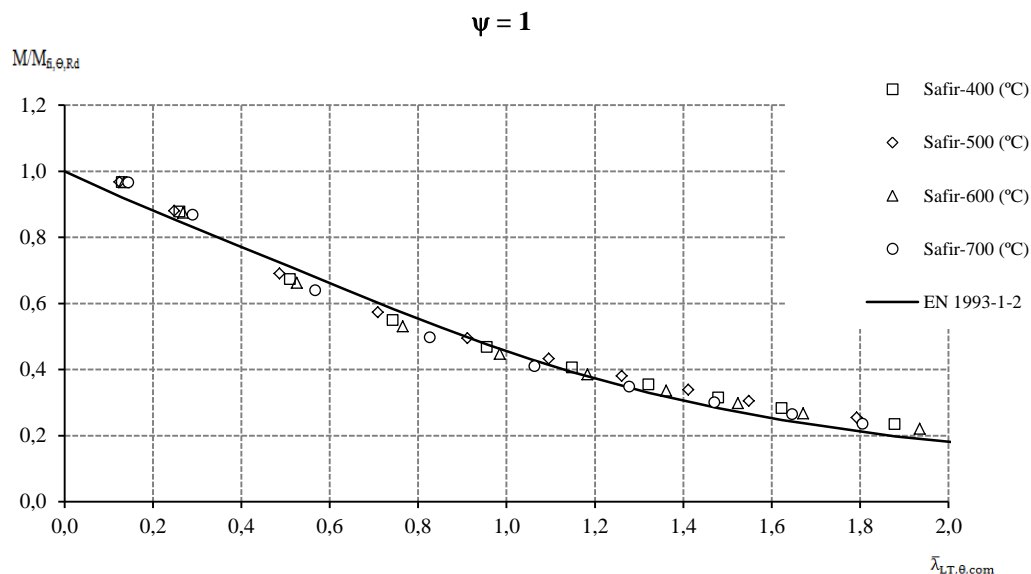


Figura 22 – IPE 500 S235 Laminado ($h/b > 2$).

4.1.3. Influência das tensões residuais

Para estudar o efeito das tensões residuais foram comparados os valores obtidos pela curva da parte 1-2 do Eurocódigo 3 com os valores numéricos recorrendo a um perfil HEB 500 de secção laminada e um de secção soldada.

Considerou-se também uma situação de diagrama de momentos uniforme ($\psi=1$) ao longo do perfil para aço do tipo S460.

Através da Figura 23 e Figura 24 é possível verificar que para o perfil de secção soldada HEA 500 a curva de encurvadura obtida pelo EN 1993-1-2, para valores de esbelteza compreendidos entre 0.6 e 1.3, se encontra acima dos valores de resistência obtidos pelo SAFIR, o que significa que não se encontram seguros.

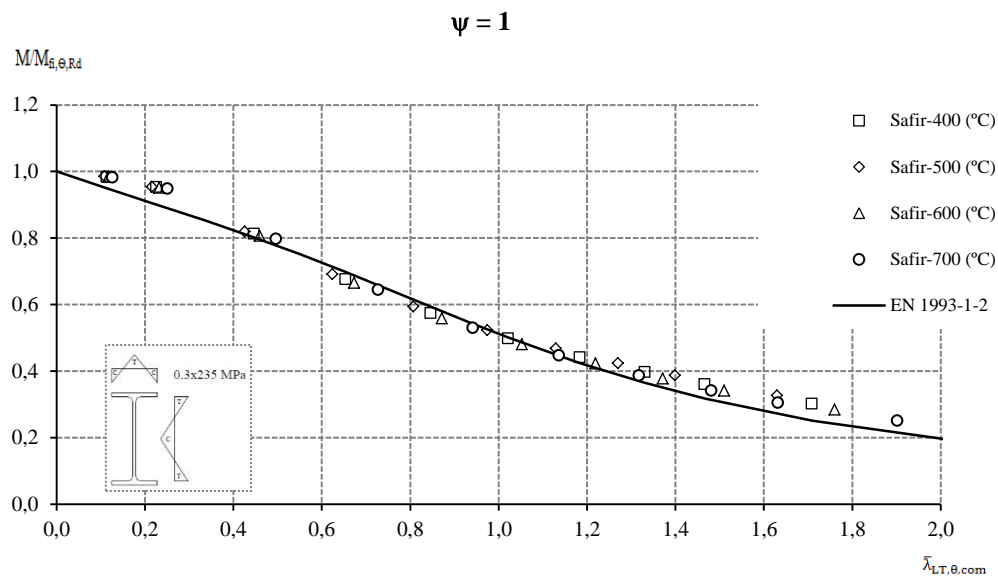


Figura 23 – HEA 500 Laminado S 460.

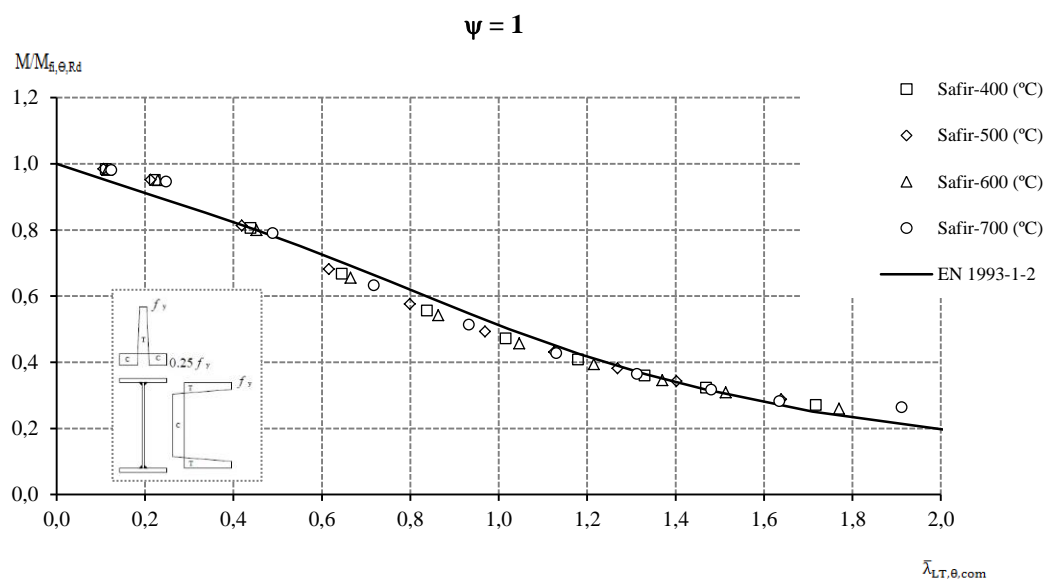


Figura 24 – HEA 500 Soldado S 460.

4.1.4. Observações

Com os resultados acima demonstrados foi possível constatar que a curva de encurvadura lateral em situação de incêndio obtida pelo método referido pela parte 1-2 do

Eurocódigo 3 apresenta, de uma forma geral, valores de resistência mais elevados do que os que são esperados quando analisado o comportamento real a que o elemento deve corresponder.

Estudos realizados (Vila Real et al., 2007b) permitem afirmar que influência do tipo de aço, do tipo de secção transversal e o efeito das tensões residuais não é assim tão grande quando consideradas separadamente. Contudo quando esses três efeitos atuam simultaneamente, a presente metodologia apresentada pelo EN 1993-1-2 apresenta-se com uma curva que se encontra fora dos limites de segurança pretendidos (Figura 13 definida em 3.2.2.1).

Por esta razão a proposta designada por “Nova Proposta” em 3.2.2 define no ponto 3.2.2.1 um fator de imperfeição α_{LT} em função, não só do tipo de aço, como também em função de um parâmetro β com o objetivo de obter uma curva melhorada em função também das restantes influências.

Acontece que apesar dos estudos produzidos (Vila Real et al., 2007a) no sentido de adaptar um novo fator de imperfeição, a Comissão Europeia de Normalização rejeitou quaisquer alterações nesse campo.

Nas figuras seguintes (Figura 25 e Figura 26) estão representadas as curvas de encurvadura lateral obtidas pelos quatro métodos apresentados, com a novidade de que mais duas novas curvas são introduzidas ao estudo, com o objetivo de exemplificar o desempenho de futuras regras de cálculo que possam vir a ser implementadas na parte 1-2 do Eurocódigo. Designadas graficamente por “EN 1993-1-2 + $f=1-0.5(1-k_c)$ ” e por “EN 1993-1-2 + $f=1-0.65(1-k_c)$ ” surgem com apenas uma alteração:

- Primeira parcela - anteriormente definidas por um fator de imperfeição α_{LT} dado em função de β passam agora a ser definidas pelo fator de imperfeição α_{LT} definido pelo atual EN 1993-1-2 (expressão (28) definida em 3.1.1.1);

- Segunda parcela - diz respeito ao fator que tem em consideração o efeito da distribuição não uniforme de momentos dado pelas expressões de f anteriormente definidas, respetivamente, em 3.2.2.2, equação (31) e em 3.2.3, equação (32).

Os métodos especificados nos capítulos anteriores para temperaturas elevadas surgem graficamente designados por:

- “EN 1993-1-2” – parte 1-2 do Eurocódigo 3, definido em 3.2.1
- “ $f=1-0.5(1-k_c)$ ” – Nova Proposta, definida em 3.2.2
- “ $f=1-0.65(1-k_c)$ ” – Nova Proposta, nova expressão de f definida em 3.2.3

- “AM-1-1-2012-01adaptado” – Proposta AM-1-1-2012-01 adaptada a temperaturas elevadas, definida em 3.2.4.

Utilizaram-se nas figuras seguintes dos perfis, IPE 220 Laminado S235 e IPE500 Soldado S460 para uma situação de distribuição de momentos uniforme $\psi=1$ com a finalidade de mostrar o desempenho de cada uma das curvas de encurvadura para uma situação favorável (Figura 25) e outra desfavorável (Figura 26).

É possível verificar para a situação favorável que cinco das seis curvas se apresentam totalmente em segurança quando comparadas com os valores de resistência obtidos numericamente. Apenas a curva obtida pelo método AM-1-1-2012-01adaptado se encontra ligeiramente acima para valores de esbelteza compreendidos entre $\bar{\lambda}_{LT}=0.4$ e $\bar{\lambda}_{LT}=1.4$.

Contrariamente à situação acima mencionada, quatro das curvas de encurvadura obtidas para a situação desfavorável apresentada pela Figura 26 encontram-se com resistências acima dos valores obtidos pelo SAFIR para valores de esbelteza entre $\bar{\lambda}_{LT}=0.6$ e $\bar{\lambda}_{LT}=1.5$. Apenas a curva de encurvadura “f=1-0.5(1-kc)” e a “f=1-0.65(1-kc)” se encontram em segurança dado que os valores numéricos se encontram, uns coincidentes e outros acima dos valores da curva.

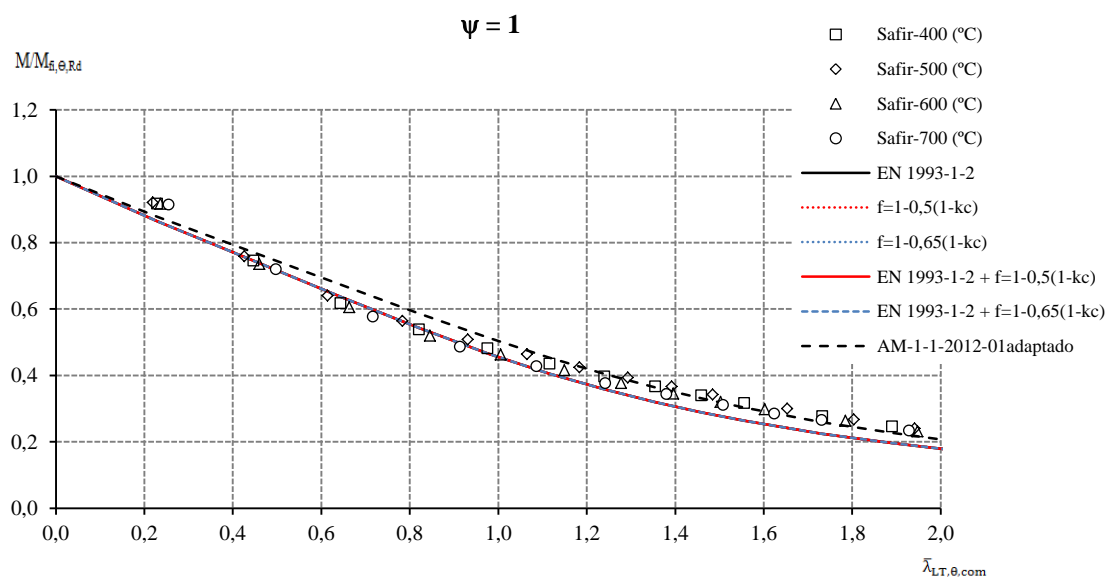


Figura 25 – IPE 220 Laminado S 235.

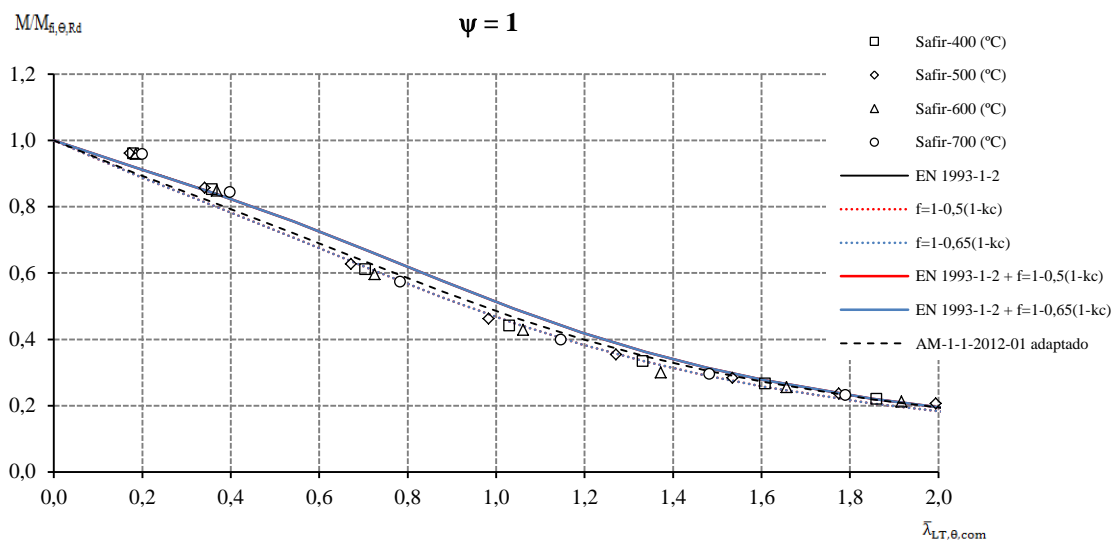


Figura 26 – IPE 500 Soldado S 460.

4.2. Influência do tipo de carregamento

Nesta secção pretende-se demonstrar graficamente a influência do tipo de carregamento aplicado ao elemento numa situação de temperaturas elevadas. São comparados aos resultados numéricos os vários procedimentos de cálculo para a determinação da resistência à encurvadura lateral.

4.2.1. Casos de Estudo

Para demonstrar o desempenho das várias regras apresentadas foi escolhido um perfil IPE 220 de secção laminada de aço do tipo S235 que foi analisado para onze situações de carregamento diferentes.

Dado que, para esta secção de aço S235, o fator de imperfeição α_{LT} dado pela expressão da parte 1-2 do Eurocódigo 3 e pela Nova Proposta é igual a $\alpha_{LT}=0.65$, nos gráficos seguintes apresentam-se apenas quatro curvas de encurvadura. Neste caso, optou-se por ocultar as curvas referentes à metodologia da Nova Proposta – “ $f=1-0.5(1-k_c)$ ” e “ $f=1-0.65(1-k_c)$ ” – visto que coincidem com as curvas “EN 1993-1-2 + $f=1-0.5(1-k_c)$ ” e “EN 1993-1-2 + $f=1-0.65(1-k_c)$ ”, respetivamente.

Encontram-se representados também os valores de resistência obtidos pelo SAFIR para as temperaturas de 400, 500, 600 e 700 °C.

Os tipos de carregamento admitidos encontram-se na Figura 27 de acordo com:

- a) Valores de ψ (1, 0.5, 0, -0.5, e -1)
- b) Carga concentrada
- c) Carga concentrada com momento numa extremidade
- d) Carga concentrada com momentos nas extremidades
- e) Carga distribuída
- f) Carga distribuída com momento numa extremidade
- g) Carga distribuída com momentos nas extremidades

Para as situações c), d), f) e g) que apresentam momentos nas extremidades combinados com cargas transversais, o valor dos momentos aplicados na viga em estudo

foram obtidos por uma análise plástica sendo que o valor de momento máximo negativo é igual valor de momento máximo positivo, como se encontra definido na parte 1-1 do Eurocódigo 3.

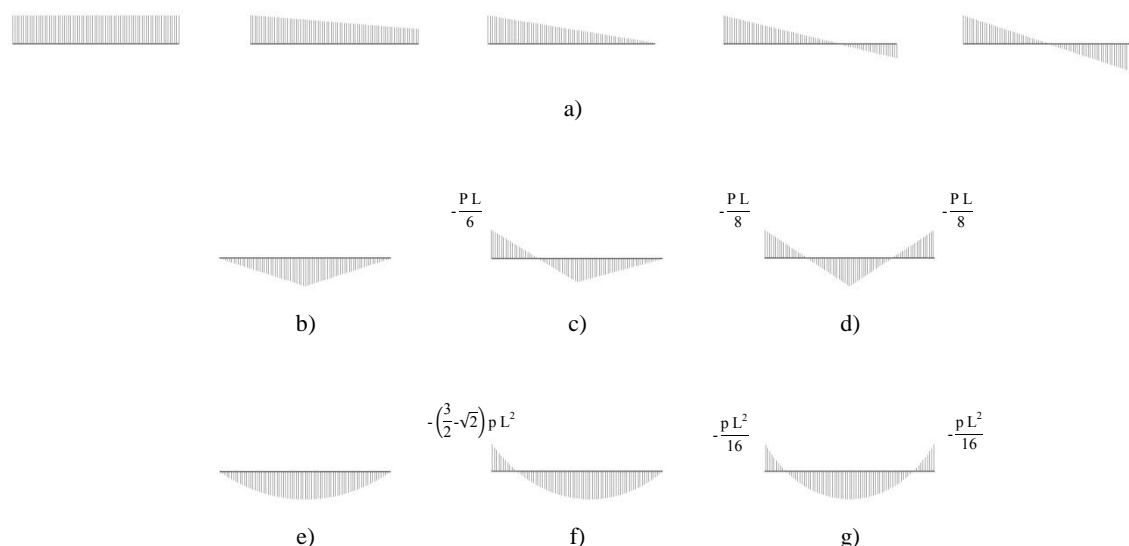


Figura 27 – Tipos de carregamentos considerados.

4.2.2. Curvas de encurvadura

Na Figura 28 estão contidos os gráficos obtidos para diferentes situações de carregamento em estudo.

Analisando os gráficos seguintes é possível verificar que, para a maioria das situações de carregamento consideradas, a curva de encurvadura lateral resultante do método preconizado pelo Eurocódigo 3, parte 1-2 denominada por “EN 1993-1-2”, se encontra com valores de resistência consideravelmente conservativos quando comparados com os resultados numéricos. Desde já se entende a importância do estudo da influência do tipo de carregamento aquando a análise da resistência à encurvadura lateral em situação de incêndio.

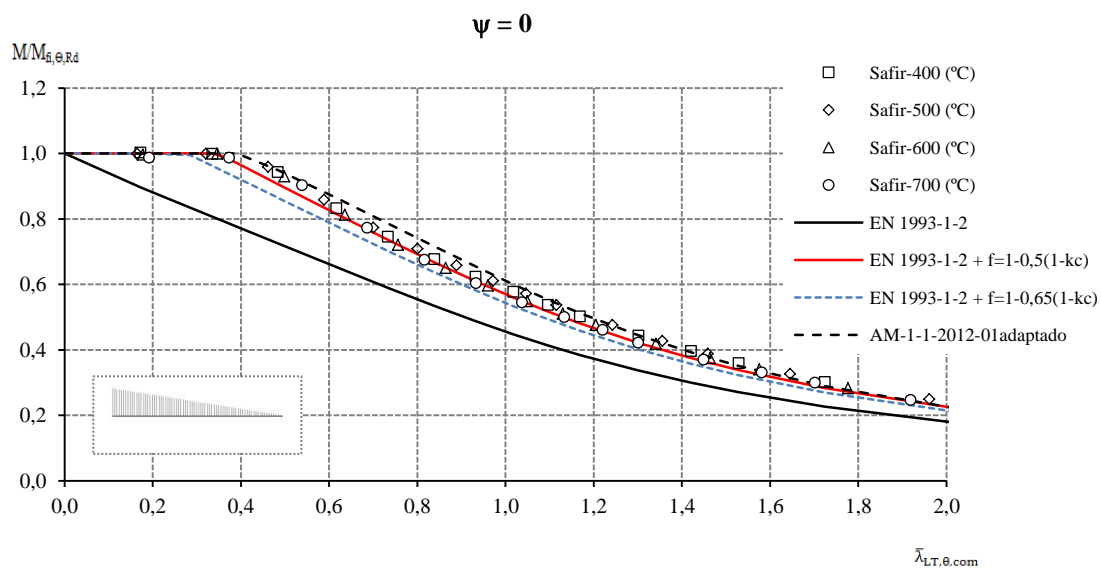
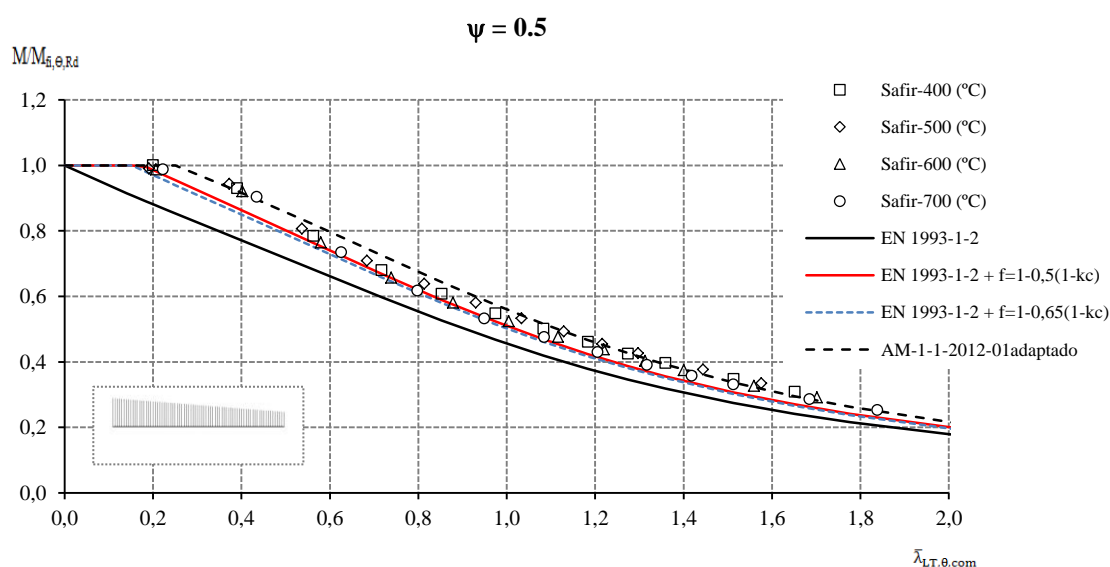
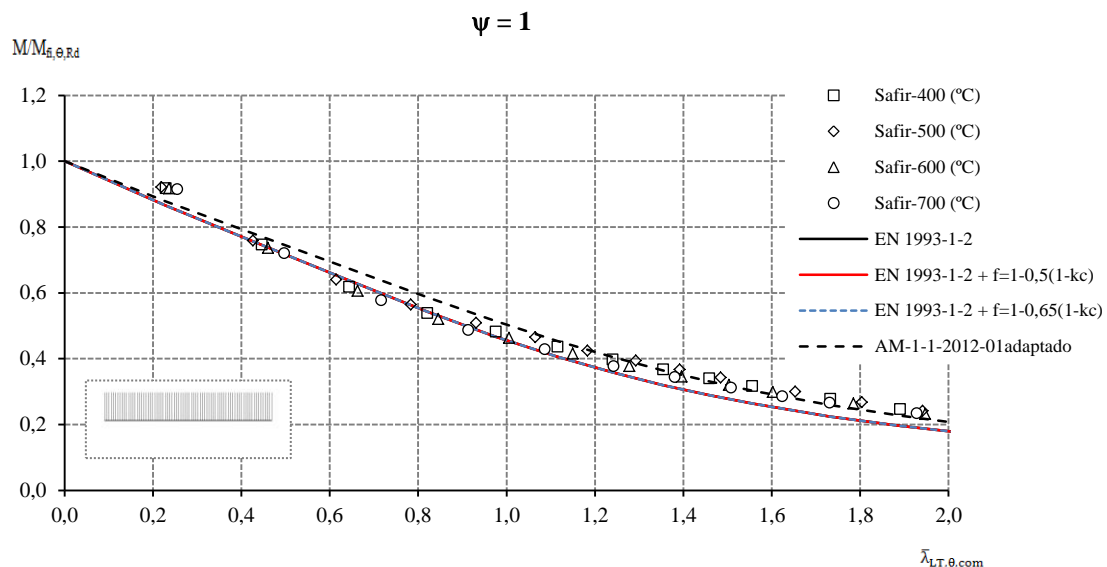
Quanto à proposta “AM-1-1-2012-01adaptado” constata-se que, apenas para situação de $\psi=-1$, a curva desenvolvida apresenta valores resistência do lado da segurança e próximos dos valores numéricos. Por outro lado, para os restantes carregamentos esta

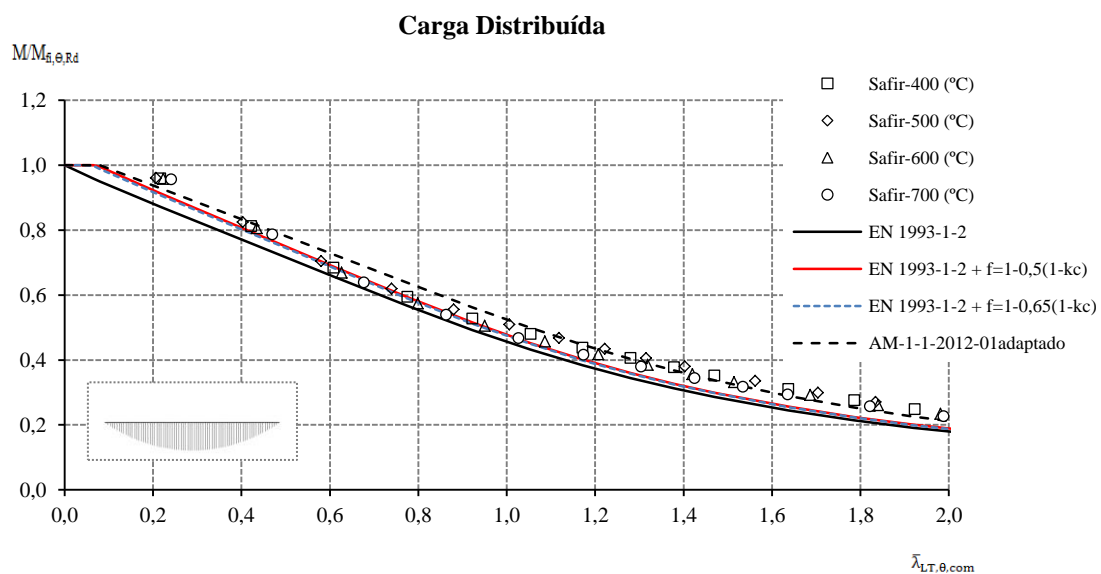
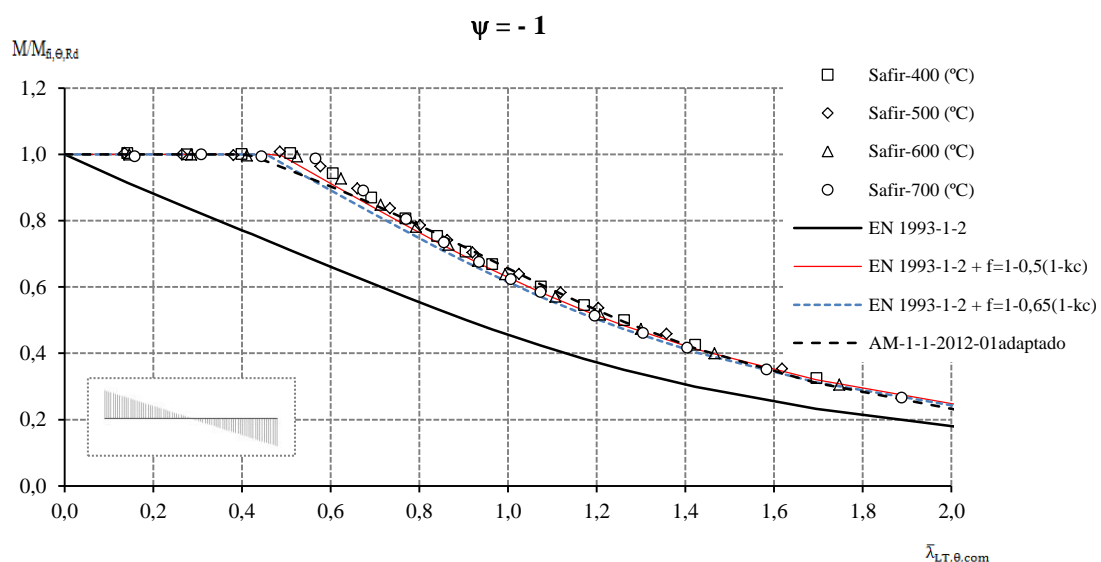
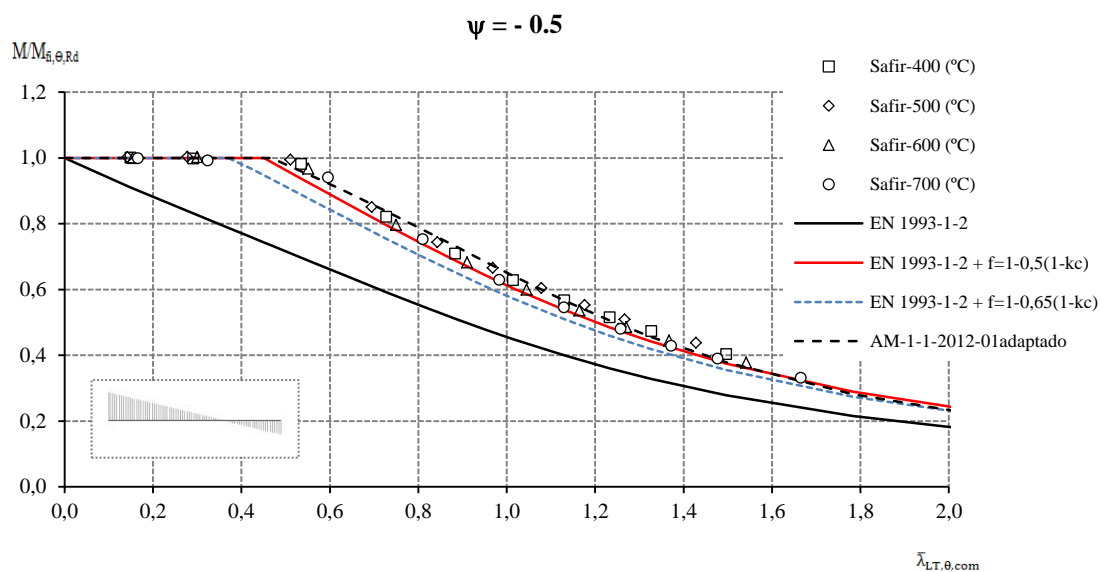
proposta apresenta-se acima das resistências limite para valores de esbelteza intermédios que variam entre 0.4 e 1.2.

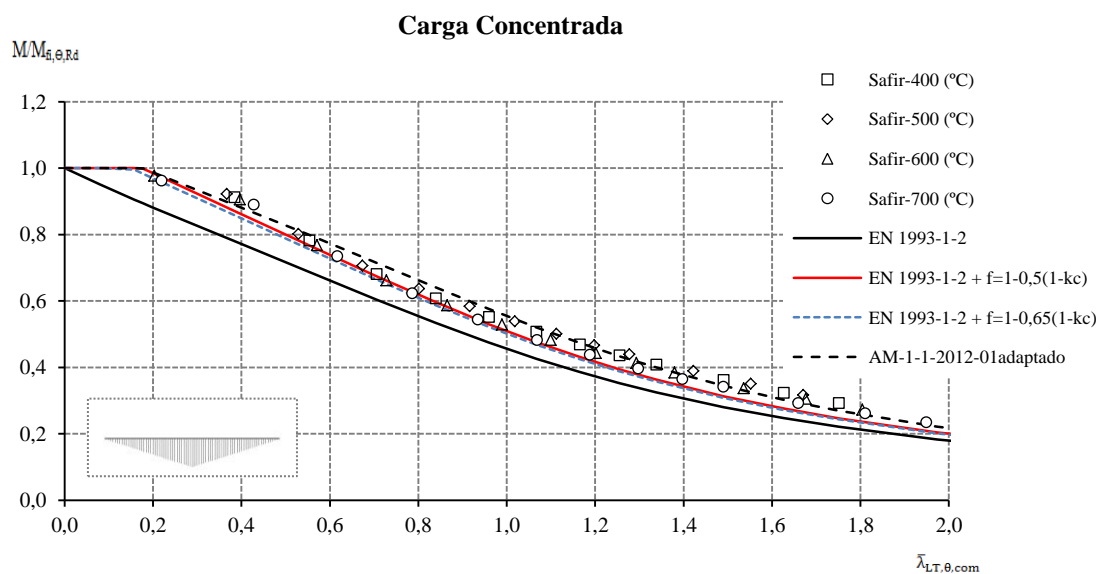
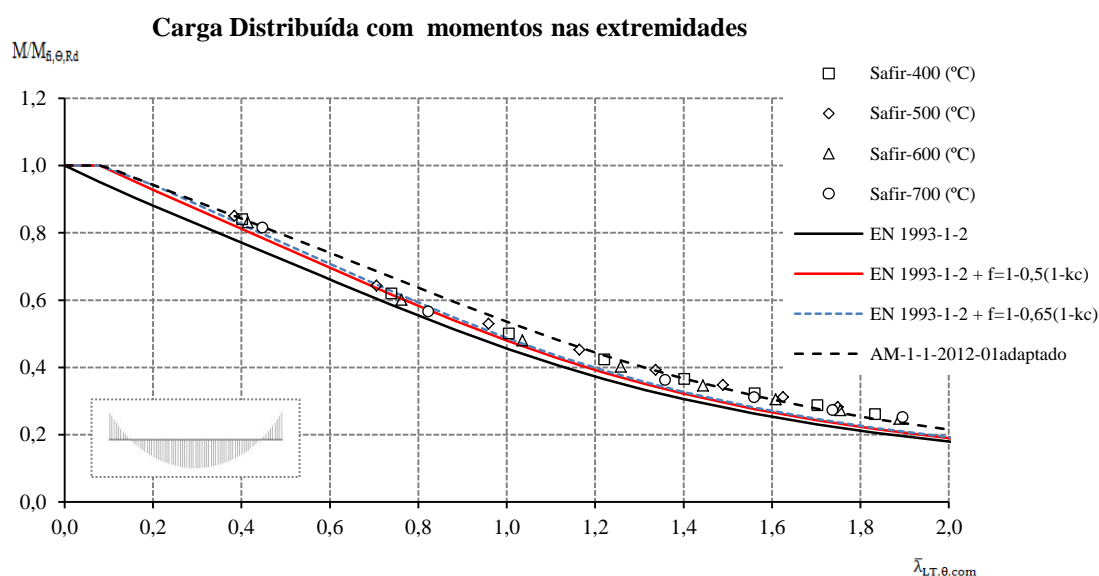
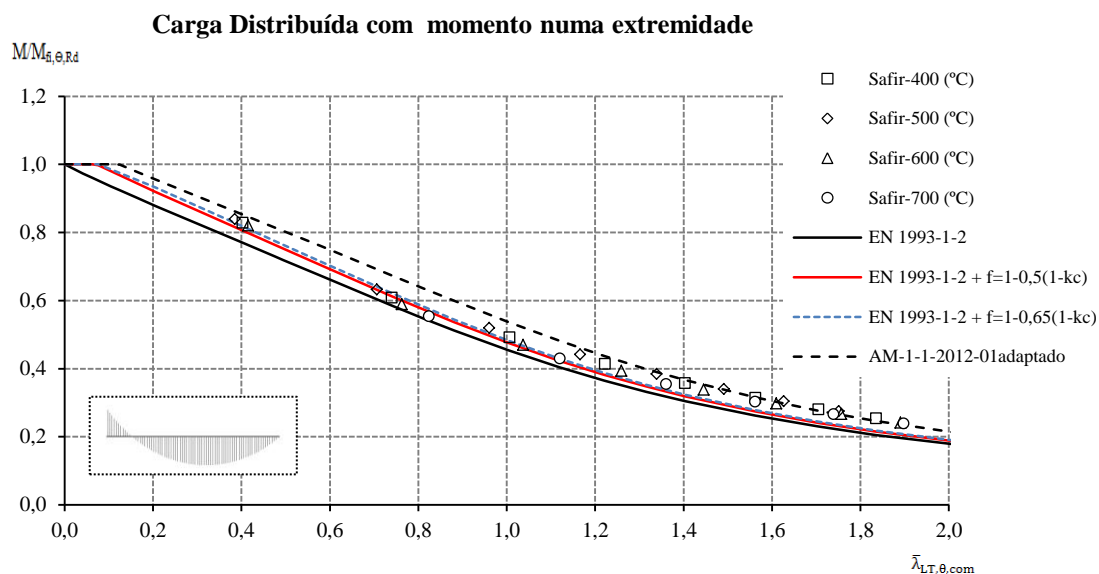
Relativamente a “EN 1993-1-2 + f=1-0.5(1-k_c)” e “EN 1993-1-2 + f=1-0.65(1-k_c)” observa-se que as curvas de encurvadura se apresentam ligeiramente desfasadas embora muito próximas dos valores de resistência tomados como referência, praticamente sempre do lado da segurança. A principal razão pela qual existe desfasamento reside no facto de a curva, dada por “EN 1993-1-2 + f=1-0.5(1-k_c)”, ter sido adaptada cuidadosamente (Vila Real et al., 2007b), por ajuste do valor de k_c , de forma a coincidir o mais possível com os resultados numéricos para cada um dos carregamentos em estudo.

Tendo em conta a análise efetuada apenas para um perfil de secção laminada de aço do tipo S 235 verifica-se que existe uma boa aproximação das curvas dadas por “EN 1993-1-2 + f=1-0.5(1-k_c)” e “EN 1993-1-2 + f=1-0.65(1-k_c)” contrariamente a “AM-1-1-2012-01” que de uma forma genérica se apresenta maioritariamente acima dos valores de resistência desejados. Contudo esta abordagem deve ser tida em conta para mais situações, nomeadamente para perfis de diferentes tipos de fabrico, de secções diferentes e para diferentes tipos de aço.

Assim sendo, na secção seguinte será feita uma análise estatística com o objetivo de perceber se a tendência de resultados se mantém considerando os fatores atrás mencionados.







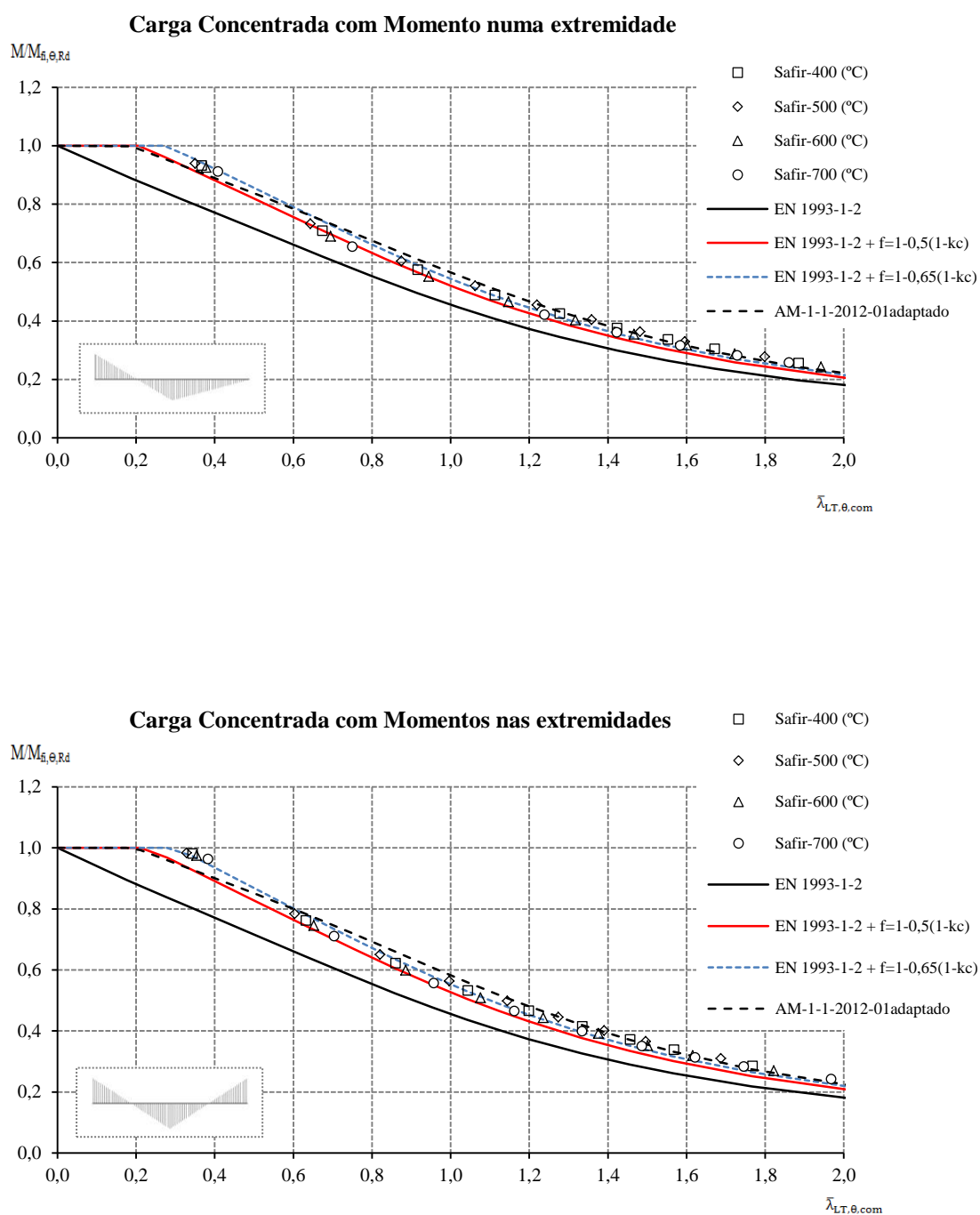


Figura 28 – Curvas de encurvadura analisadas comparadas com os resultados numéricos obtidos para o IPE 220 laminado S 235 para os 11 carregamentos estudados.

4.3. Estatística

O estudo aqui apresentado tem como objetivo entender, mediante várias considerações, quais das propostas analisadas se aproxima mais e de forma segura, dos valores de resistência obtidos por simulações numéricas.

Para efetuar este estudo analisaram-se mais de 5000 simulações numéricas dadas pelo programa SAFIR calculadas para os três perfis destacados, tendo em conta o tipo de secção e o tipo de aço, para sete diferentes condições de carregamento (Tabela 12).

Tabela 12 – Casos de estudo.

Perfil	Secção	Tipo de aço	Situações de Carregamento						
			ψ					Carga	Carga
			1.0	0.5	0.0	-0.5	-1.0	Concentrada	Distribuída
IPE 220	Laminada	S 235	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		S 355	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		S 460	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Soldada	S 235	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		S 355	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		S 460	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
HEA 500	Laminada	S 235	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		S 355	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		S 460	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Soldada	S 235	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		S 355	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		S 460	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
IPE 500	Laminada	S 235	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		S 355	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		S 460	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Soldada	S 235	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		S 355	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		S 460	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

4.3.1. Método de análise

Para cada uma das propostas foram reunidos todos os valores de resistência á encurvadura lateral em situação de incêndio (400°, 500°, 600° e 700°) obtidos para todos os casos considerados. Dessa forma foi possível avaliar qual a relação entre a resistência determinada pelos processos analíticos, $M_{b,rd}^{Analitico}$ e a resistência correspondente obtida pelo programa SAFIR, $M_{b,rd}^{Safir}$. Essa relação é também a relação entre os fatores de redução χ_{LT} determinados pelas regras de cálculo e pelo programa:

$$x_i = \frac{M_{b,rd}^{Analitico}}{M_{b,rd}^{Safir}} = \frac{\chi_{LT,i}^{Analitico}}{\chi_{LT,i}^{Safir}} \quad (37)$$

Assim, através da equação (37) pode afirma-se que para valores de x_i menores do que 1, o método de cálculo analisado se encontra em segurança e para valores de x_i superiores a 1, o método se encontra fora do limite de segurança.

Consideraram-se como medidas estatísticas a média μ e o desvio padrão σ que foram determinadas a partir de:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (38)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n - 1}} \quad (39)$$

Onde n é o número total de simulações numéricas utilizadas.

As figuras seguintes (Figura 29, Figura 30, Figura 31) ilustram os gráficos obtidos para cada um dos métodos. São apresentadas apenas as situações de carregamento correspondentes às vigas com momentos aplicados nas extremidades para valores de ψ correspondentes a 1, 0 e -1. As restantes situações poderão ser consultadas em anexo.

No eixo das ordenadas estão representados os valores obtidos pelos métodos em estudo enquanto o eixo das abcissas exibe os resultados obtidos pelo programa SAFIR. É possível observar também uma reta representada por um traço contínuo que tem como utilidade definir a fronteira entre os valores que apresentam segurança e os que se apresentam inseguros.

Tabela 13 – Resultados estatísticos para as situações de carregamento $\psi=1$, $\psi=0$, $\psi=-1$.

Carregamento $\psi=1$	EN 1993-1-2	$f = 1-0.5(1-k_c)$	$f=1-0.65(1-k_c)$	AM-1-1-2012- 01 _{adaptado}	EN1993-1-2 + $f=1-0.5 (1-k_c)$	EN1993-1-2 + $f=1-0.65 (1-k_c)$
μ	0.9707	0.9448	0.9448	1.0219	0.9707	0.9707
σ	0.0715	0.0625	0.0625	0.0755	0.0715	0.0715
$\psi=0$						
μ	0.8153	0.9688	0.9328	0.9939	0.9934	0.9617
σ	0.0595	0.0351	0.0456	0.0585	0.0403	0.0502
$\psi=-1$						
μ	0.7786	0.9935	0.9776	0.9769	1.0177	1.0015
σ	0.0712	0.0221	0.0266	0.0541	0.0325	0.0309

4.3.2. Observações

Através da Tabela 13 facilmente se entende que o método de cálculo preconizado pela parte 1-2 do Eurocódigo 3, para as três situações de carregamento, apresenta valores médios sempre inferiores a 1, sendo que para as situações de carregamento $\psi=0$ e $\psi=-1$

esses valores se encontram largamente afastados do valor limite. Deste modo conclui-se que dadas as situações, este é um método seguro mas demasiado conservativo.

Analisando as três propostas apresentadas em 3.2 para temperaturas elevadas:

- Nova Proposta – graficamente denominada por “ $f=1-0.5(1-k_c)$ ”
- Nova proposta com nova expressão de f – “ $f=1-0.65(1-k_c)$ ”
- Proposta AM-1-1-2012-01 – “AM-1-1-2012-01_{adaptado}”

constata-se que os valores médios, à exceção de AM-1-1-2012-01_{adaptado} para $\psi=1$, se encontram todos em segurança, isto é, inferiores a 1.

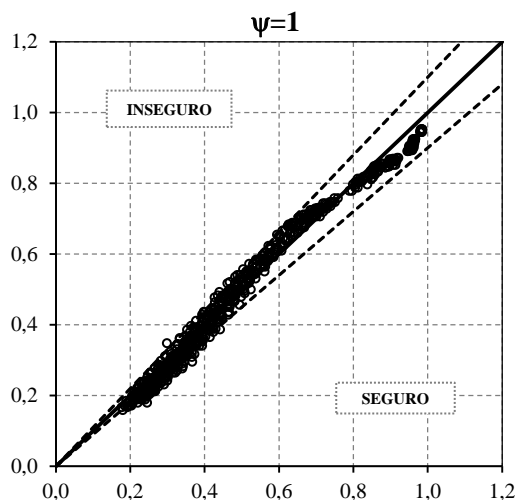
Acontece que para esta ultima proposta, os valores de desvio padrão obtidos revelam sempre uma maior dispersão de resultados em relação às propostas “ $f=1-0.5(1-k_c)$ ” e “ $f=1-0.65(1-k_c)$ ” para todas as situações analisadas na Tabela 13 e Tabela 14. Assim sendo esta é uma proposta que não revela tanta precisão quanto as outras.

Relativamente às propostas “ $f=1-0.5(1-k_c)$ ” e “ $f=1-0.65(1-k_c)$ ” pode afirmar-se que ambas revelam segurança e um nível de precisão muito próximo. Os seus valores, média e desvio padrão, não se afastam muito uns dos outros, embora se verifique que “ $f=1-0.5(1-k_c)$ ” é a proposta que apresenta o valor médio mais próximo de 1 na maior parte das situações de carregamento e o menor desvio padrão.

Destacam-se ainda duas últimas propostas – “EN1993-1-2 + $f=1-0.5(1-k_c)$ ” e “EN1993-1-2 + $f=1-0.65(1-k_c)$ ” - que surgiram com a finalidade de acrescentar ao método especificado pelo EN 1993-1-2 a influência do tipo de carregamento f dada por duas expressões distintas. É possível observar que as duas se apresentam muito próximas, quer em média, quer em desvio padrão (Tabela 13 e Tabela 14).

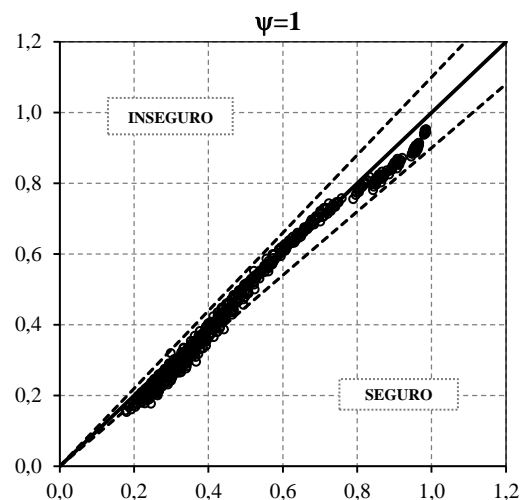
Em resumo, analisadas as propostas verifica-se que da adaptação de umas das propostas aqui apresentadas, “EN1993-1-2 + $f=1-0.5(1-k_c)$ ” ou “EN1993-1-2 + $f=1-0.65(1-k_c)$ ”, ao método referido pela parte 1-2 do Eurocódigo 3, resultará uma maior e viável aproximação dos valores de resistência à encurvadura lateral em situação de incêndio aos valores de resistência obtidos tendo em conta o comportamento real do elemento.

EN 1993-1-2



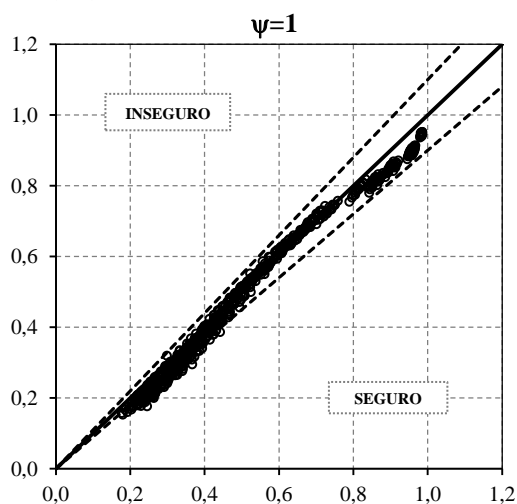
Safir

$f = 1-0.5(1-k_c)$



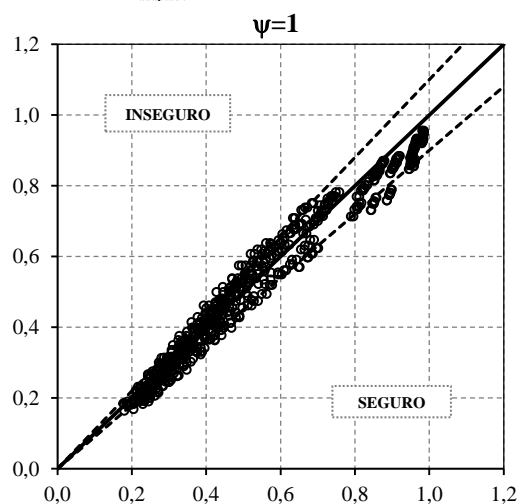
Safir

$f=1-0.65(1-k_c)$



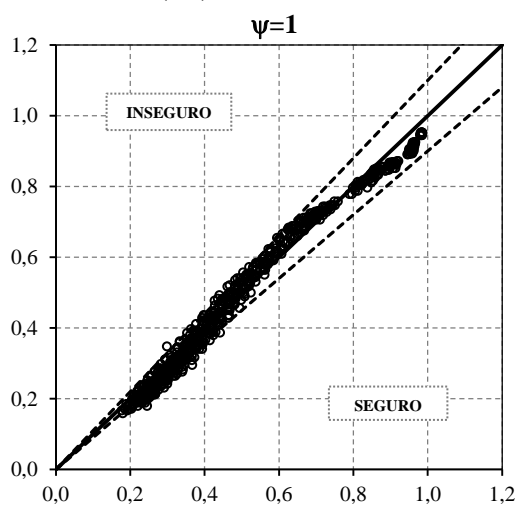
Safir

AM-1-1-2012-01_{adaptado}



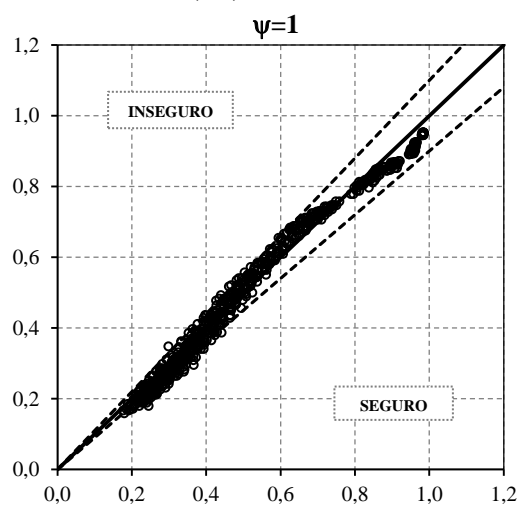
Safir

EN1993-1-2 + $f=1-0.5(1-k_c)$



Safir

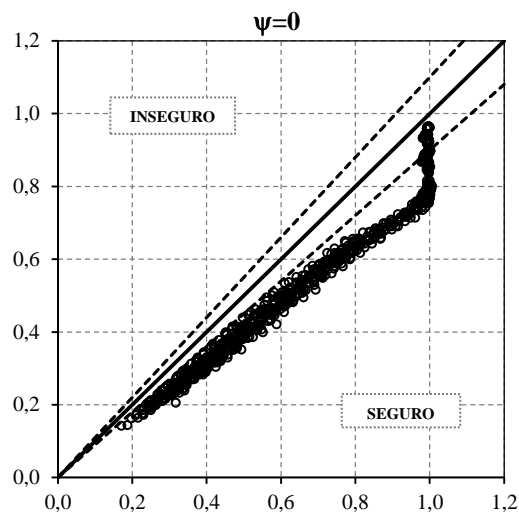
EN1993-1-2 + $f=1-0.65(1-k_c)$



Safir

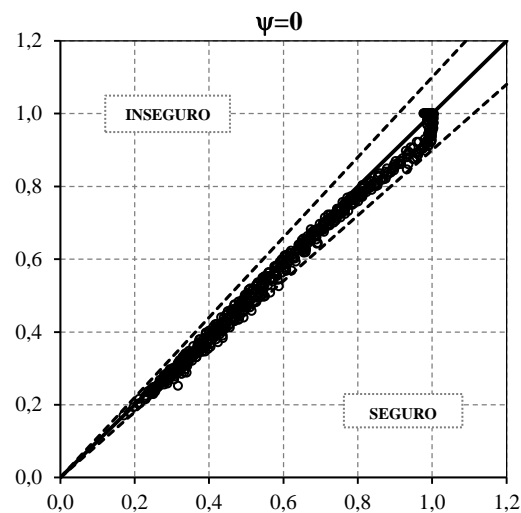
Figura 29 – Análise estatística de todos os métodos analíticos comparados com os valores obtidos pelo programa SAFIR para o tipo de carregamento $\psi=1$.

EN 1993-1-2



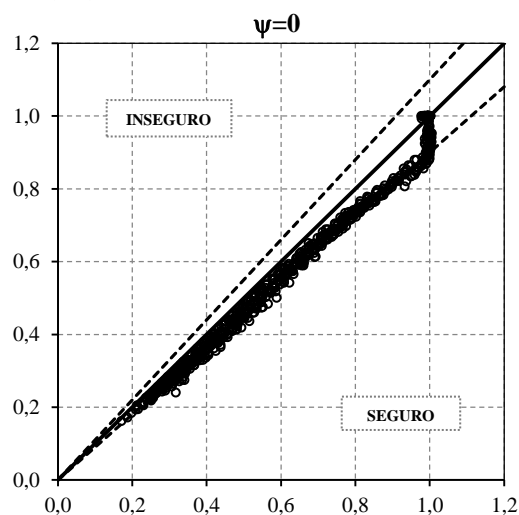
Safir

$f = 1-0.5(1-k_c)$



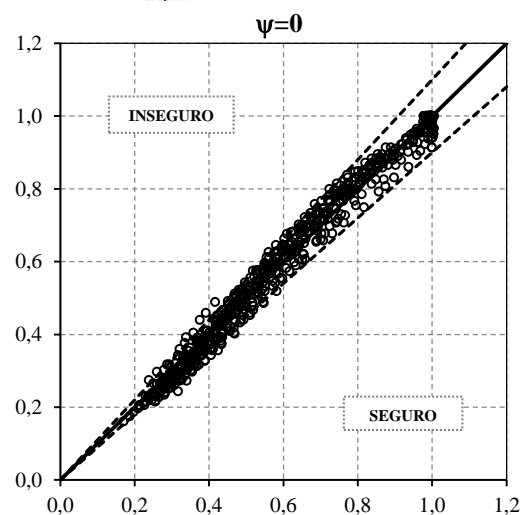
Safir

$f=1-0.65(1-k_c)$



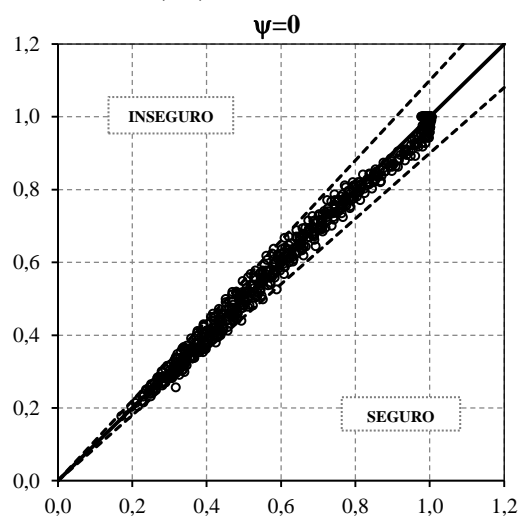
Safir

AM-1-1-2012-01_{adaptado}



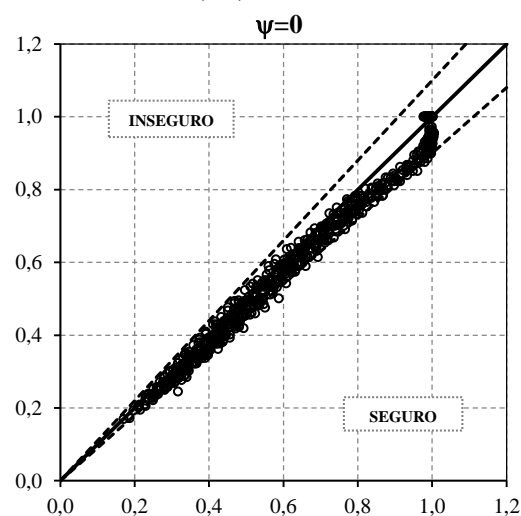
Safir

EN1993-1-2 + $f=1-0.5(1-k_c)$



Safir

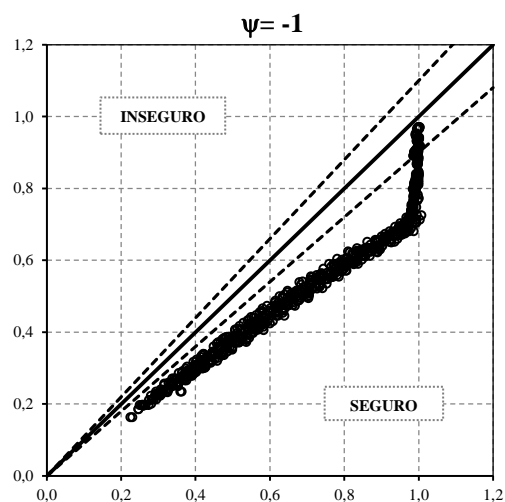
EN1993-1-2 + $f=1-0.65(1-k_c)$



Safir

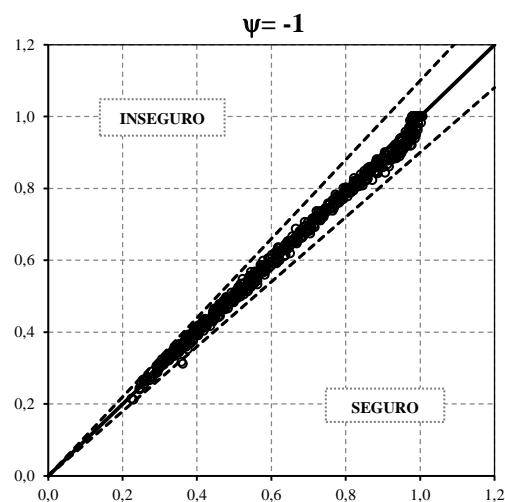
Figura 30 – Análise estatística de todos os métodos analíticos comparados com os valores obtidos pelo programa SAFIR para o tipo de carregamento $\psi=0$.

EN 1993-1-2



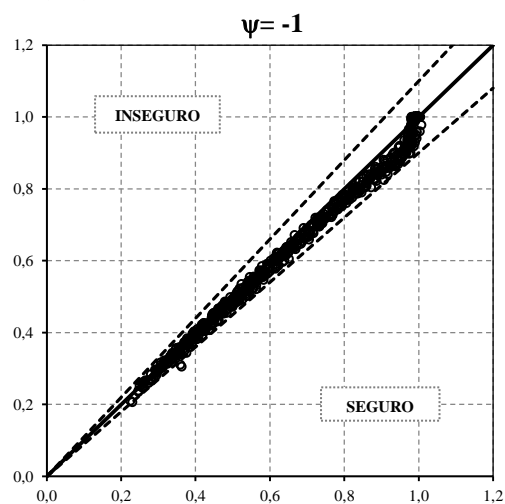
Safir

$f = 1-0.5(1-k_c)$



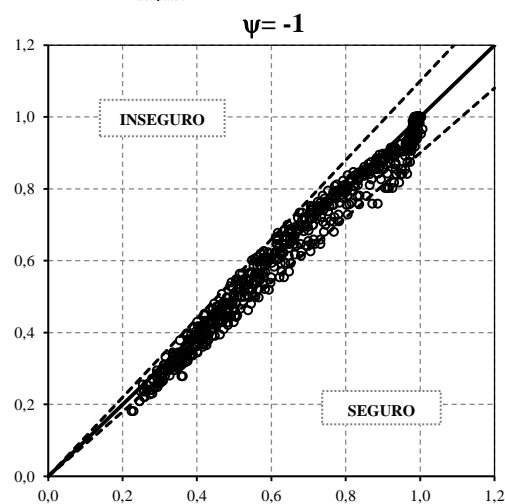
Safir

$f=1-0.65(1-k_c)$



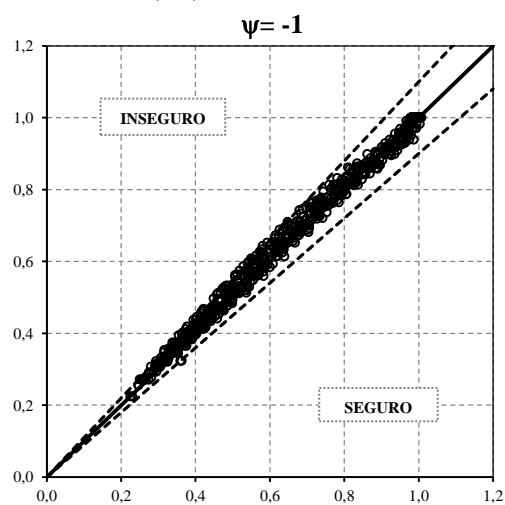
Safir

AM-1-1-2012-01_{adaptado}



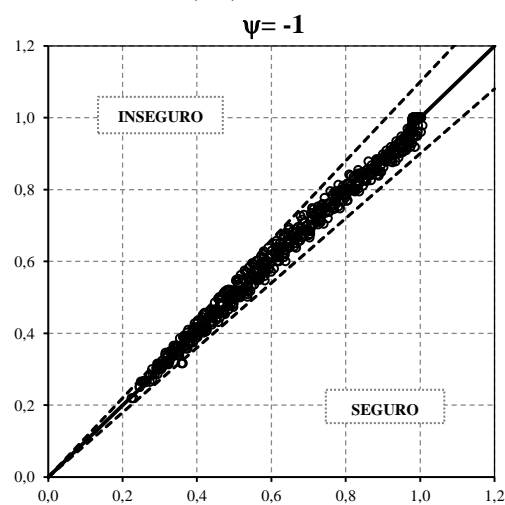
Safir

EN1993-1-2 + $f=1-0.5(1-k_c)$



Safir

EN1993-1-2 + $f=1-0.65(1-k_c)$



Safir

Figura 31 – Análise estatística de todos os métodos analíticos comparados com os valores obtidos pelo programa SAFIR para o tipo de carregamento $\psi=-1$.

Tabela 14 – Resultados estatísticos para os restantes carregamentos: $\psi=0.5$, $\psi=-0.5$, carga concentrada e carga distribuída.

Carregamento $\psi=0.5$	EN 1993-1-2	f = 1-0.5(1-kc)	f=1-0.65(1-kc)	AM-1-1-2012- 01 _{adaptado}	EN1993-1-2 + f=1-0.5 (1-kc)	EN1993-1-2 + f=1-0.65 (1-kc)
μ	0.8584	0.9324	0.9188	0.9882	0.9580	0.9506
σ	0.0593	0.0577	0.0582	0.0746	0.0635	0.0683
$\psi=-0.5$						
μ	0.7769	0.9759	0.9376	0.9768	1.0004	0.9618
σ	0.0681	0.0289	0.0437	0.0546	0.0328	0.0397
Carga Concentrada						
μ	0.8848	0.9591	0.9456	1.0021	0.9849	0.9713
σ	0.0521	0.0480	0.0490	0.0584	0.0546	0.0548
Carga Distribuída						
μ	0.9258	0.9433	0.9374	1.0097	0.9694	0.9634
σ	0.0647	0.0598	0.0595	0.0744	0.0677	0.0673

Capítulo 5

ESTUDO NUMÉRICO DE CASOS ADICIONAIS

5. ESTUDO NUMÉRICO DE CASOS ADICIONAIS

5.1. Modelo numérico

5.2. Curvas de encurvadura

5. ESTUDO NUMÉRICO DE CASOS ADICIONAIS

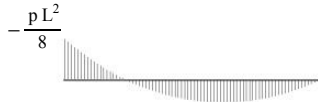





Nesta secção serão analisadas três situações de carregamento distintas das anteriormente apresentadas correspondentes a uma análise elástica de vigas sujeitas a cargas transversais uniformes ou concentradas a meio vão e a momentos na extremidade. Os carregamentos analisados foram os seguintes:

- Carga distribuída com momento numa extremidade;
- Carga distribuída com momento nas duas extremidades;
- Carga concentrada a meio vão com momento numa extremidade.

Os diagramas de momentos considerados na parte 1-1 do Eurocódigo 3 para o cálculo de k_c são obtidos através de uma análise plástica.

Recorrendo a uma análise elástica os diagramas de momentos podem ser diferentes dos considerados anteriormente. A Tabela 15 exhibe para cada um dos carregamentos, os momentos tidos em conta.

Tabela 15 - Momentos considerados para as situações de carregamento em análise.

Casos analisados (análise elástica)	Diagramas do EN 1993-1-1 (análise plástica)
<p>a) </p>	<p>d) </p>
<p>b) </p>	<p>e) </p>
<p>c) </p>	<p>f) </p>

5.1. Modelo Numérico

Como modelo, foi escolhida uma viga simplesmente apoiada nas extremidades em apoios em forquilha, sujeita a combinação de cargas transversais e momentos nas extremidades sendo as cargas aplicadas a meio do centro de corte da secção transversal.

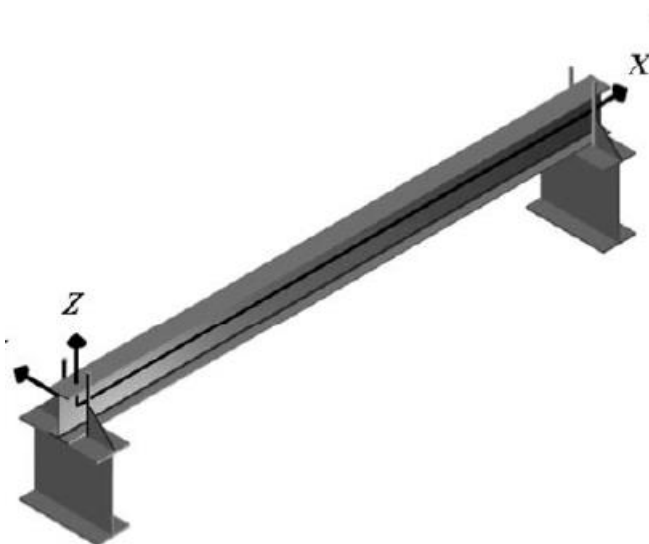


Figura 32 – Modelo viga simplesmente apoiada nas extremidades em apoios em forquilha (Vila Real et al., 2007b).

O programa utilizado foi o SAFIR tendo sido obtidos 150 novas simulações para o perfil IPE 220 Laminado de aço do tipo S 235.

Este modelo foi ensaiado às temperaturas de 400, 500, 600 e 700 considerando uma distribuição uniforme da temperatura na secção transversal ao longo de toda a viga para os comprimentos de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10 e 14 metros (Figura 34).

Foi considerada uma imperfeição geométrica lateral dada pela expressão (40) e ainda introduzida uma rotação inicial em torno do eixo longitudinal (segundo x - Figura 32) seguindo a mesma senoide tomando o valor máximo de $l/1000$ radianos.

$$y(x) = \frac{l}{1000} \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right) \quad (40)$$

Onde l é o comprimento da viga.

As tensões residuais adotadas são constantes em toda a espessura da alma e dos banzos. São de compressão nas extremidades dos banzos e a meio da alma e de tração nas zonas de ligação entre a alma e os banzos. Para secção laminada a quente, é considerada uma distribuição triangular com um valor máximo de $0,3 \times 235 \text{ MPa}$ (Figura 33).

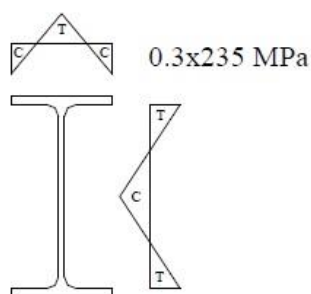
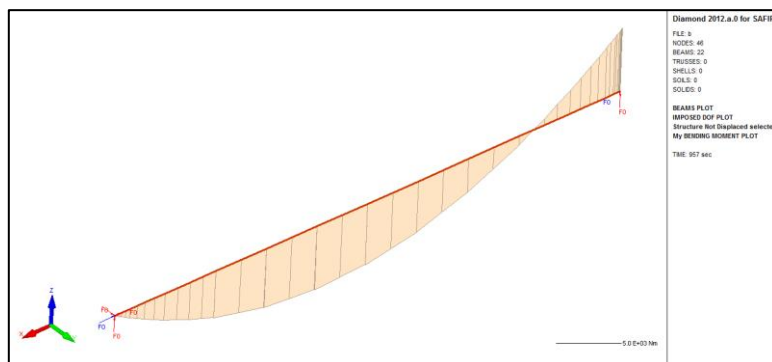
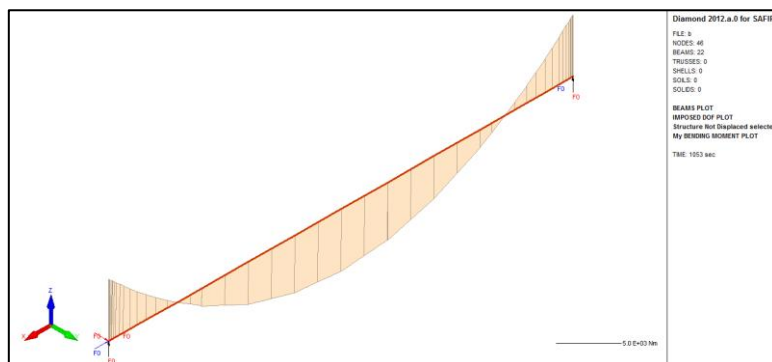


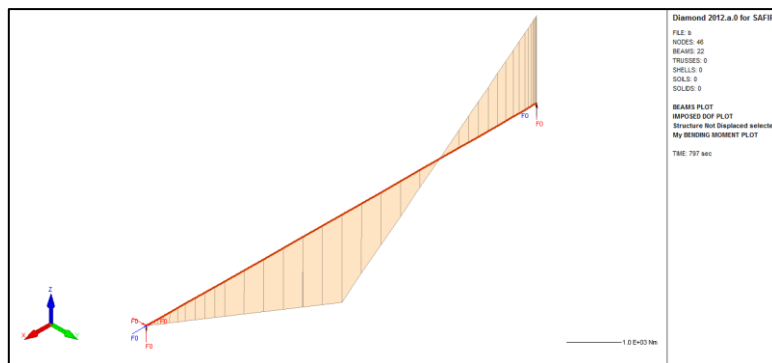
Figura 33 – Tensões residuais secção laminada: C – zona comprimida; T – zona tracionada.



a)



b)



c)

Figura 34 – Modelo numérico utilizado e respetivos diagramas de momento.

5.2. Curvas de encurvadura




Nesta secção apresentam-se, para as situações consideradas, os valores de C_1 obtidos por consulta das tabelas (Galéa, 2002), e os correspondentes valores de k_c calculados a partir da expressão preconizada pela parte 1-1 do Eurocódigo 3. Visto que, para Nova Proposta definida em 3.2.2, os valores de k_c foram determinados e estabelecidos apenas para as situações de carregamento definidas nessa secção (Tabela 16).

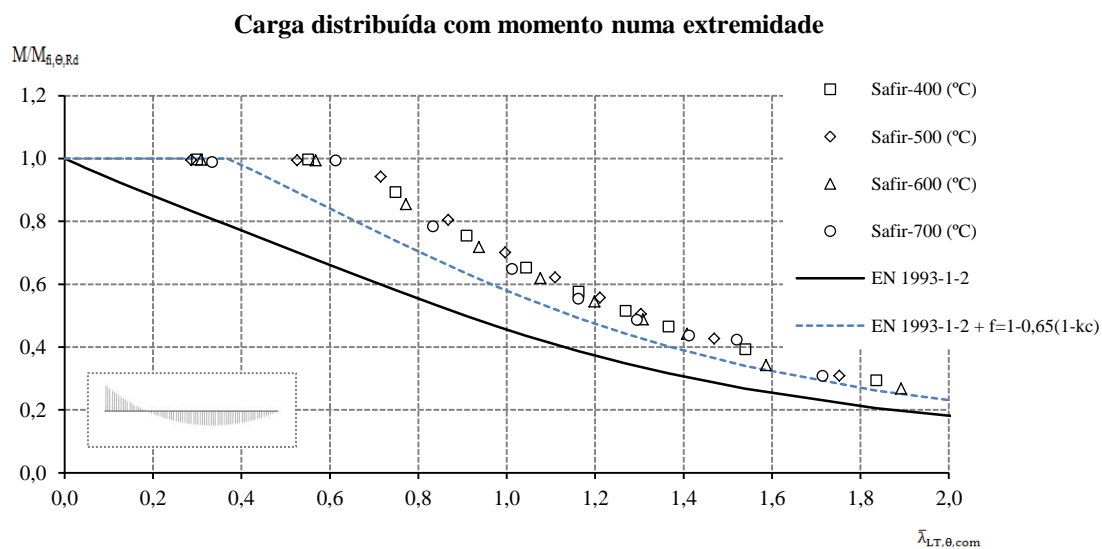
Nos gráficos seguintes observam-se apenas duas curvas de encurvadura: uma obtida pelo método apresentado pela parte 1-2 do Eurocódigo 3 – graficamente designado por “EN1993-1-2” – e outra obtida pelo mesmo método desta vez adaptado do fator f definido em 3.2.3 – graficamente designado por “EN1993-1-2 + $f=1-0.65(1-k_c)$ ”.

Analisando a Figura 35, que contempla os gráficos obtidos para cada uma das situações, verifica-se para todas as situações, que a curva de encurvadura originada pelo método de cálculo preconizado pelo EN 1993-1-2, se apresenta demasiado conservativa em relação aos resultados obtidos pelas simulações.

Por outro lado, e como seria de esperar, ao ser introduzida a influência do tipo de carregamento no método de cálculo apresentado pela parte 1-2 do Eurocódigo 3 dada pela expressão de f definida em 3.2.3, constata-se que a nova curva de resistência à encurvadura lateral, embora não se apresente exatamente coincidente com os valores numéricos, apresenta uma aproximação significativa estando sempre do lado da segurança.

Tabela 16 – Valores de C_1 e k_c correspondentes aos carregamentos tidos em conta nesta secção.

Tipos de carregamento		C_1	$k_c = \frac{1}{\sqrt{C_1}}$
a)		2.22	0.67
b)		2.58	0.62
c)		1.87	0.73



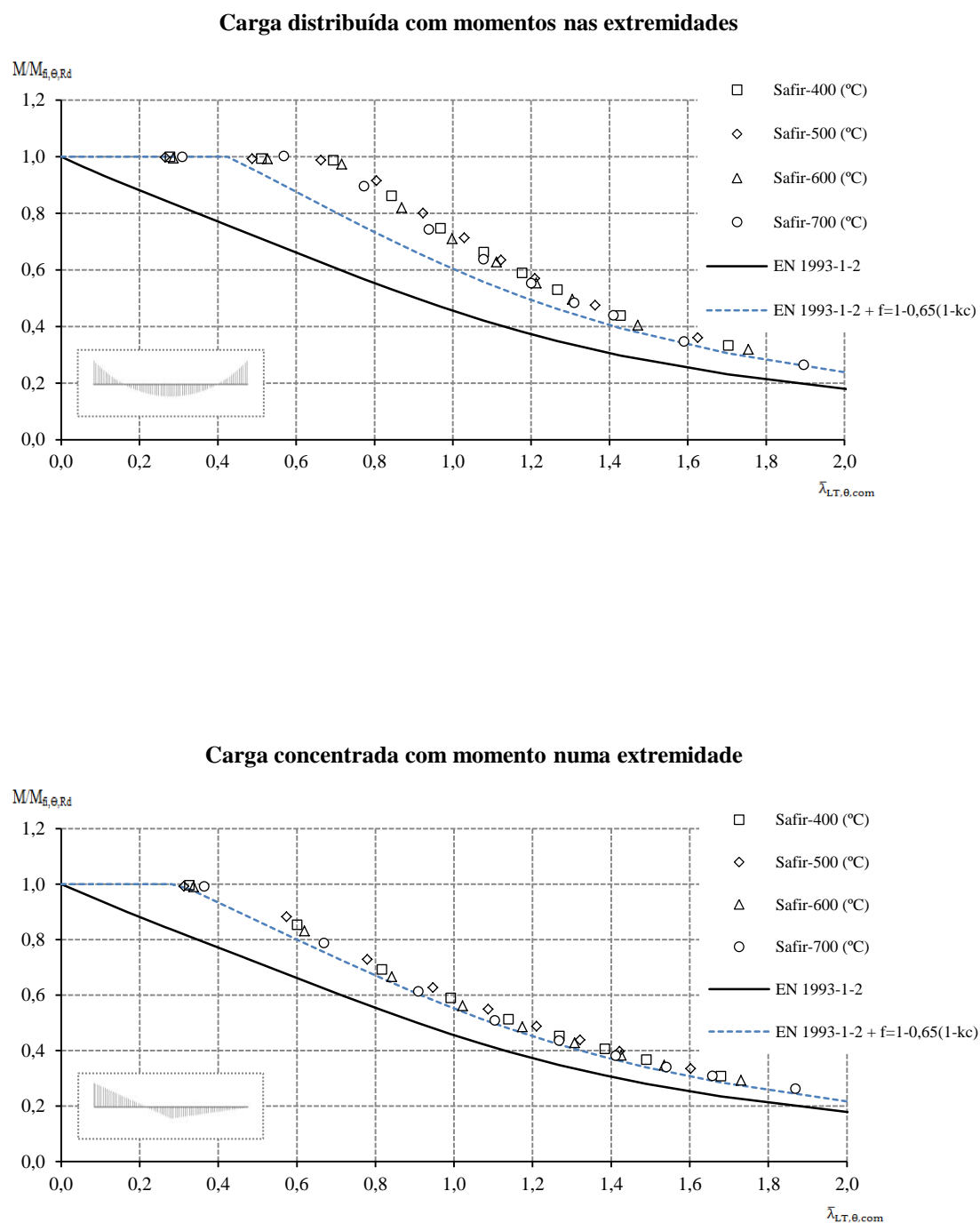


Figura 35 – IPE 220 Laminado S 235 analisado para três situações de carregamento distintas.

Capítulo 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta dissertação apresenta-se um estudo sobre a resistência ao fogo de vigas sujeitas a encurvadura lateral dando particular atenção à influência do tipo de carregamento.

Em relação ao comportamento à temperatura normal, analisando o método preconizado pela parte 1-1 do Eurocódigo 3 e comparando-o à metodologia apresentada pela proposta denominada neste trabalho por AM-1-1-2012-01, constata-se que existe uma pequena diferença entre as duas curvas de encurvadura lateral. Numa primeira abordagem, estas diferenças não parecem justificar a alteração de praticamente todo o método de cálculo proposto na atual versão do Eurocódigo 3.

Em situação de incêndio, nas propostas para a determinação do valor de resistência à encurvadura lateral, observa-se que as diferentes curvas (Nova proposta, Nova proposta adaptada de um novo fator f e Proposta AM-1-1-2012 adaptada, definidas em 3.2.2, 3.2.3e 3.2.4, respetivamente) se encontram, na maioria das situações de carregamento, muito próximas entre si mas ligeiramente afastadas da curva obtida pelo método proposto pelo Eurocódigo 3.

Verifica-se que, para algumas situações de carregamento, a proposta AM-1-1-2012-01 se encontra fora dos limites de segurança dados pelos resultados numéricos. Por outro lado, observa-se que a curva obtida recorrendo à expressão do fator f que aplica $k_c = \frac{1}{\sqrt{c_1}}$ se apresenta, na generalidade dos casos de carregamento considerados, com valores de resistência muito próximos dos resultados numéricos e do lado da segurança, embora ligeiramente inferiores aos valores obtidos pela expressão do fator f apresentada em 3.2.2.

Feita a análise estatística conclui-se que, a proposta AM-1-1-2012-01 não apresenta a melhor aproximação quando comparada com as restantes para todos os casos considerados dado que é a que apresenta uma maior dispersão de resultados dada pelo desvio padrão e alguns resultados inseguros.

Assim, analisadas as restantes propostas, observa-se que, tal como o esperado, a Nova proposta apresentada em 3.2.2, (denominada graficamente por $f=1-0.5(1-k_c)$ ” em

4.3.2) é a que exibe maior precisão dado que foi calibrada de forma a coincidir com os resultados numéricos. Contudo, a Nova proposta apresentada em 3.2.3 apresenta valores muito próximos desta tanto para média como para desvio padrão.

Na perspectiva de, futuramente, ser tida em conta a influência do tipo de carregamento na resistência à encurvadura lateral dada pelo EC3 em situação de incêndio, fez-se um estudo estatístico para cada uma das diferentes abordagens (graficamente denominadas por “EN1993-1-2 + $f=1-0.5(1-kc)$ ” e “EN1993-1-2 + $f=1-0.65(1-kc)$ ” em 4.3.2) que permitiu concluir uma vez mais que ambas apresentam valores muito próximos e do lado da segurança. Assim sendo, a expressão de f dada por:

$$f = 1 - 0.65(1 - kc) \quad (41)$$

seria a que melhor se adequaria ao presente método preconizado pela parte 1-2 do Eurocódigo visto que exibe a vantagem de poder ser tido em conta qualquer tipo de carregamento.

Por fim, foram analisadas três novas situações de carregamento que mostram que o procedimento de cálculo preconizado pelo EN 1993-1-2, afetado do fator f dado pela expressão (41), apresenta curvas de encurvadura dispostas do lado da segurança e valores de resistência não tão conservativos quanto o atual método do EN 1993-1-2.

Posto isto, conclui-se que a consideração da influência do tipo de carregamento com a expressão (41) no cálculo da resistência à encurvadura lateral em vigas I ou H, de secção de classe 1 ou 2, em situação de incêndio, traduz uma melhor e mais segura aproximação às resistências obtidas numericamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ayrton, W.E., P.J., (1886). “*On struts*”. The engineer.

Benyamina, A. B.; Meftah, S. A.; Mohri, F.; Daya, E. M.; (2013). “Analytical solutions attempt for lateral torsional buckling of doubly symmetric web-tapered I-beams”. Engineering Structures. 56: 1207-1219

Bruins, R. H. J., (2007). “*Lateral-torsional buckling of laterally restrained steel beams*”. Documento interno. Technische Universiteit Eindhoven.

Cazeli, R., Vila Real P., Silva V.P., Piloto P.A.G., (2001). “*Numerical modelling of the lateral-torsional buckling of steel I beam under fire conditions*”. A contribution to validate a new proposal for part 1-2 of the Eurocode 3. In: I Congresso Internacional da Construção Metálica – I CICOM, São Paulo, Brasil.

CEN, Comité Européen De Normalização; (1995). “*ENV 1993–1–2, Eurocode : Design of Steel Structures – Part 1–1: General rules and rules for buildings*”. Bruxelas, Bélgica.

CEN, Comité Européen De Normalização; (2005a). “*EN 1993–1–1, Eurocode : Design of Steel Structures – Part 1–1: General rules and rules for buildings*”. Bruxelas, Bélgica.

CEN, Comité Européen De Normalização; (2005b). “*EN 1993–1–2, Eurocode : Design of Steel Structures – Part 1–1: General rules and rules for buildings*”. Bruxelas, Bélgica.

Franssen, J.-M.; (2000). *Structures in fire – Proceedings of the first international workshop*.

Franssen, J.-M.; (2011). *“User's manual for SAFIR 2011- A computer program for analysis of structures subjected to fire”*. Department ArGENCO. University of Liège.

Galéa, Y.; (2002). *“Déversement élastique d'une poutre à section bi-symétrique soumise à des moments d'extrémité et une charge répartie ou concentrée”*. Revue Construction Métallique.

Lopes, N.; (2007). *“Verificação da segurança à encurvadura lateral: expressões do EC3”*. Documento interno, Departamento Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

Maquoi, R.J.; (1978). *“Mise en Equation des Nouvelles Courbes Européennes de Flambement”*. Revue Construction Métallique.

Nguyen, T. T.; Chan, T.M.; Mottram, J.T.; (2013). *“Influence of boundary conditions and geometric imperfections on lateral-torsional buckling resistance of a pultruded FRP I beam by FEA”*. Composite Structures. 100: 233-242

Reis, A. e Camotim D.; (2001). *“Estabilidade estrutural”*, Amadora: MsGraw-Hill

Simões da Siva, L.; Rebelo, C.; Nethercot, D.; Marques, L.; Simões, R.; Vila Real, P.; (2009). “*Statistical evaluation of the lateral-torsional buckling resistance of steel I beams - Part 2: variability of steel properties*”. Journal of Constructional Steel Research. 65: 832-849

Simões, R. A. D.; (2007). “*Manual de Dimensionamento de Estruturas Metálicas*”. Associação Portuguesa de Construções Metálicas e Mistas

Taras, A. e Greiner R.;(2010). “*New design curves for lateral-torsional buckling-Proposal based on a consistent derivation*”. Journal of Constructional Steel Research. 66: 648-663.

Taras, A.; Greiner R.; Unterweger H.; (2013). “*Proposal for amended rules for member buckling and semi-compact cross-section design – AM-1-1-2012-01*”.

Vila Real, P. e Franssen, J.-M.; (1999). “*Lateral buckling of steel I beams under fire conditions – comparison between the Eurocode 3 and the Safir code*”. Internal report No. 99/02, Institute of Civil Engineering – Service Ponts et Charpents – of the University of Liège.

Vila Real, P. e Lopes, N.; (2013). “*Influência do tipo de carregamento no cálculo da resistência à encurvadura lateral-Nova proposta*”. Documento interno, Departamento Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

Vila Real, P.; Cazeli R.; Simões da Silva L.; Santiago A.; Piloto, P.A.G.;(2004a). “*The effect of residual stresses in the lateral-torsional buckling of steel I beams at elevated temperature*”. Journal of Constructional Steel Research. 60: 783-793.

Vila Real, P.; Franssen J.-M.; (2001). “*Numerical modelling of lateral buckling of steel I beams under fire conditions – comparison with Eurocode 3*”. J Fire Prot Eng, USA,; 11(2): 112-28.

Vila Real, P.; Lopes N.; Simões da Silva L.; Franssen J.-M.; (2004b). “*Lateral-torsional buckling of unrestrained steel beams under fire conditions: improvement of EC3 proposal*”. Computers and Structures. 82: 1737-1744.

Vila Real, P.; Lopes, N.; Simões da Silva, L.; Franssen, J.-M.; (2007a). “*Parametric analysis of the lateral-torsional buckling resistance of steel beams in case of fire*”. Fire Safety Journal. 42: 416-424

Vila Real, P.; Lopes, N.; Simões da Silva, L.; Franssen, J.-M.; (2007b). “*Lateral-torsional buckling of steel elements in case of fire: Improvement of the EC3*”. Documento para a technical commission nº3 of the European Convention of Constructional Steelwork (ECCS-TC3 Technical committee 3 - fire resistance). Universidade de Aveiro, 6 a 7 de Setembro.

Vila Real, P.; Piloto P.A.G.; Franssen J.-M.; (2003). “*A new proposal of a simple model for the lateral-torsional buckling of unrestrained steel I beams in case of fire: experimental and numerical validation*”. Journal of Constructional Steel Research. 59: 179-199.

Zivner, T. J.; (2012). “*The influence of constructional detail to lateral-torsional buckling of beams*”. Procedia Engineering. 40: 504-509.



ANEXOS

Proposta para alteração da secção 4.2.3.3 do EN 1993-1-2

4.2.3.3 Vigas com secções transversais da Classe 1 ou da Classe 2

- (1) Igual ao definido em EN 1993-1-2
- (2) Igual ao definido em EN 1993-1-2
- (3) Igual ao definido em EN 1993-1-2
- (4) Igual ao definido em EN 1993-1-2
- (5) O valor de $\chi_{LT,fi}$ deverá ser determinado de acordo com as seguintes expressões:

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\phi_{LT,\theta,com} + \sqrt{[\phi_{LT,\theta,com}]^2 - [\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}]^2}} \quad (4.12)$$

Com

$$\phi_{LT,\theta,com} = \frac{1}{2} \cdot [1 + \alpha \bar{\lambda}_{LT,\theta,com} + (\bar{\lambda}_{LT,\theta,com})^2] \quad (4.13)$$

$$\alpha = 0.65 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (4.14)$$

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com} = \bar{\lambda}_{LT} [k_{y,\theta,com}/k_{E,\theta,com}]^{0.5} \quad (4.15)$$

Em que;

$k_{E,\theta,com}$ fator de redução para a inclinação da reta que representa o domínio elástico à temperatura máxima do aço no banzo comprimido $\theta_{a,com}$ atingida no instante t , definido na secção 3.

- (6) Para ter em conta a distribuição de momentos fletores entre os travamentos laterais dos elementos, o coeficiente de redução $\chi_{LT,fi}$ poderá ser modificado da seguinte forma:

$$\chi_{TL,fi,mod} = \frac{\chi_{LT,fi}}{f} \text{ Mas } \chi_{LT,fi,mod} \leq 1 \quad (4.16)$$





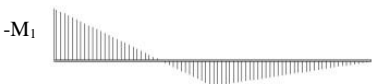
Onde f depende do tipo de carregamento e dever ser obtido pela seguinte expressão:

$$f = 1 - 0,65(1 - k_c) \quad (4.17)$$

Onde k_c é uma fator de correção de acordo com a tabela #

Tabela # - Fatores de correção k_c .

	Distribuição de momentos	$k_c = \frac{1}{\sqrt{c_1}}$
$\psi=1$		1.00
$\psi=0.5$		0.87
$\psi=0$		0.75
$\psi=-0.5$		0.65
$\psi=-1$		0.62
		0.86
$-M_1$		0.77
$-M_1$		0.82
		0.94

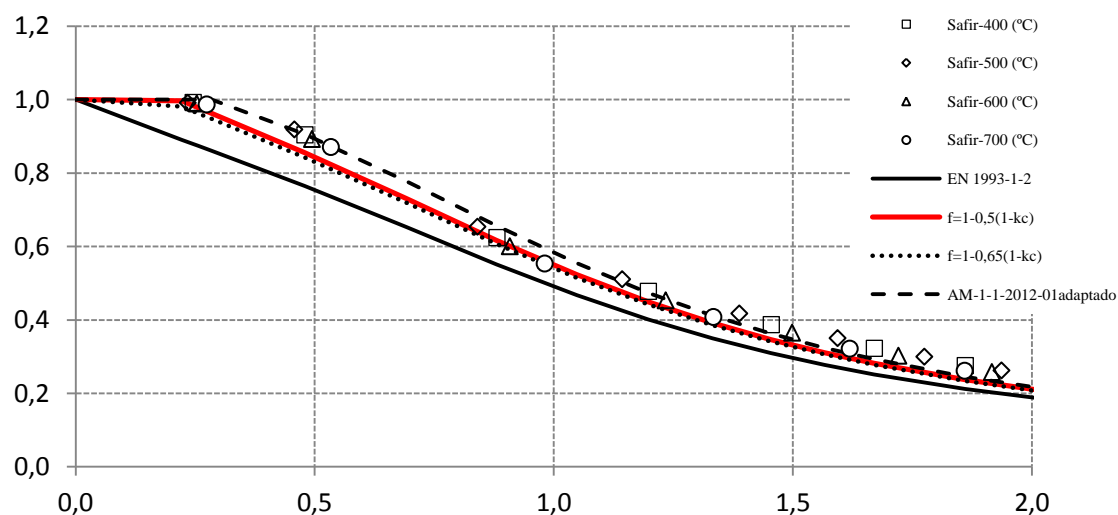
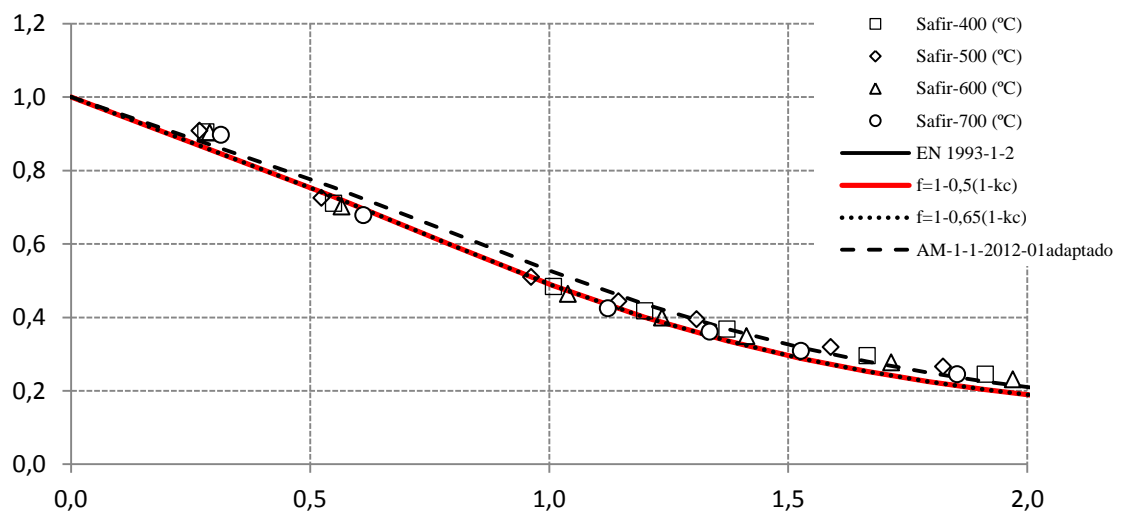
	0.90
$M_2 = -M_1$	
	0.91
$M_2 = -M_1$	
Análise elástica	
	0.67
$M_2 \neq -M_1$	
	0.62
$M_2 \neq -M_1$	
	0.73
$M_2 \neq -M_1$	
C_1 constante que figura na expressão do momento crítico de encurvadura lateral de vigas por flexão torção, cujo valor depende das condições de apoio e carregamento e deve ser obtido de literatura especializada	

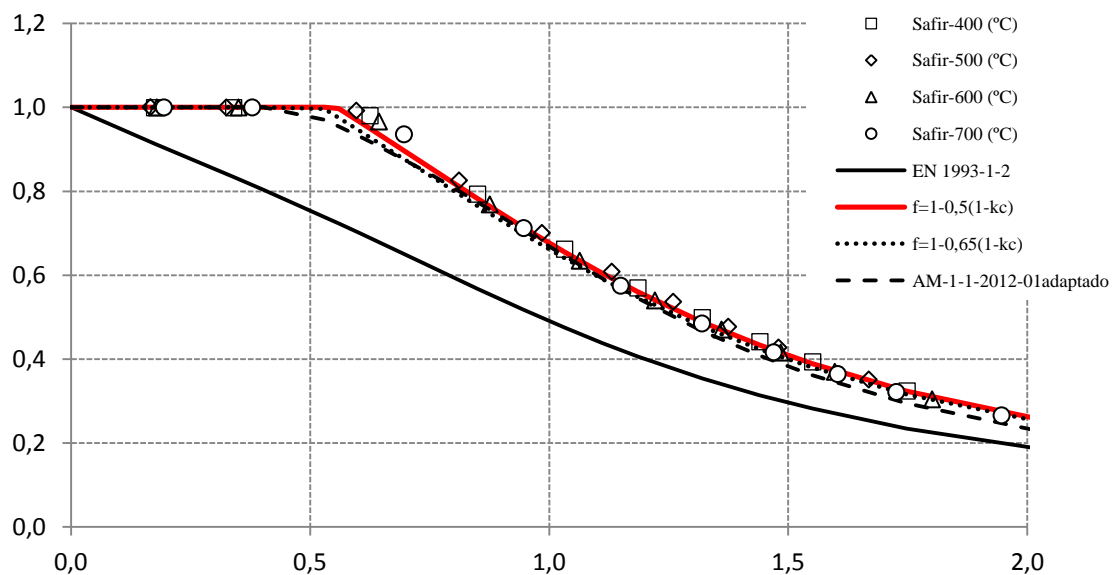
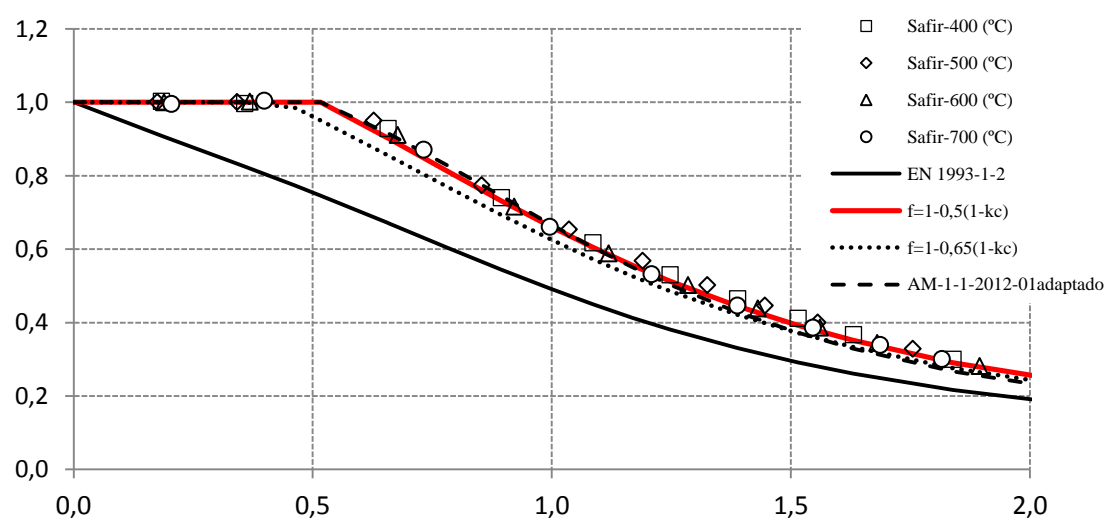
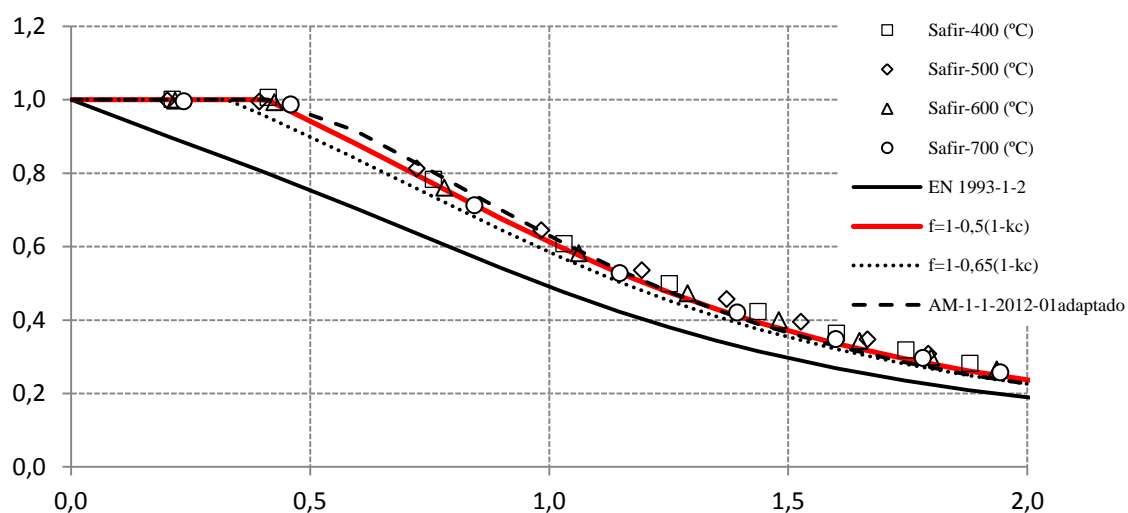
Curvas de encurvadura para todos os casos analisados.

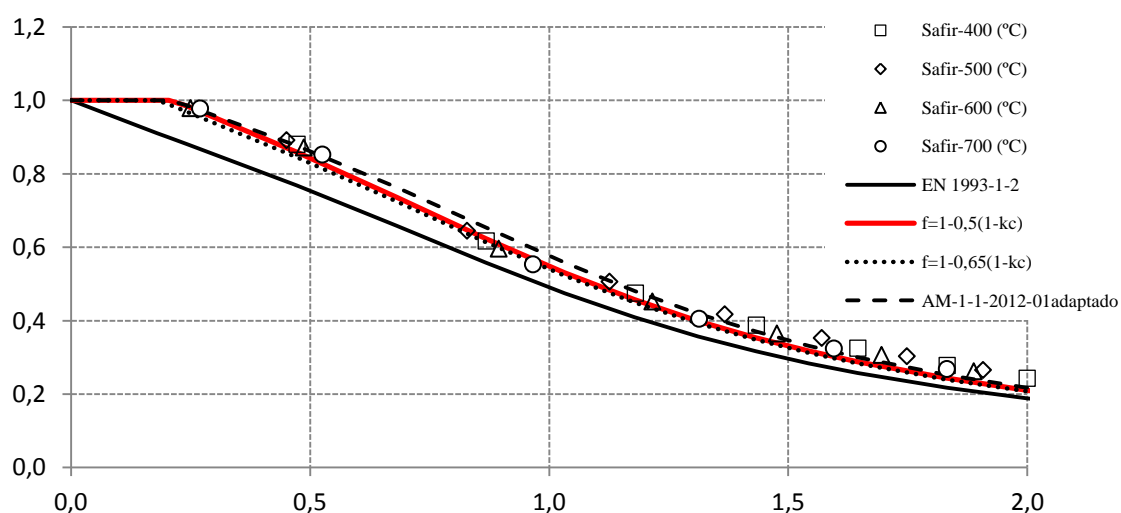
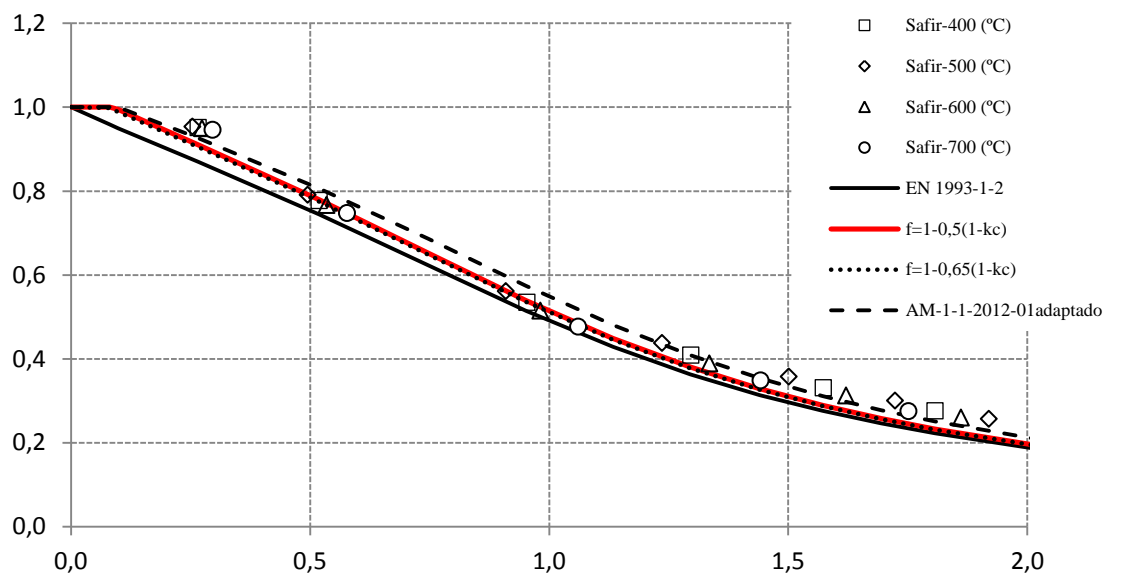
Os gráficos para cada um dos perfis encontram-se pela seguinte ordem de carregamento:

1. $\psi=1$
2. $\psi=0.5$
3. $\psi=0$
4. $\psi=-0.5$
5. $\psi=-1$
6. carga distribuída
7. carga concentrada

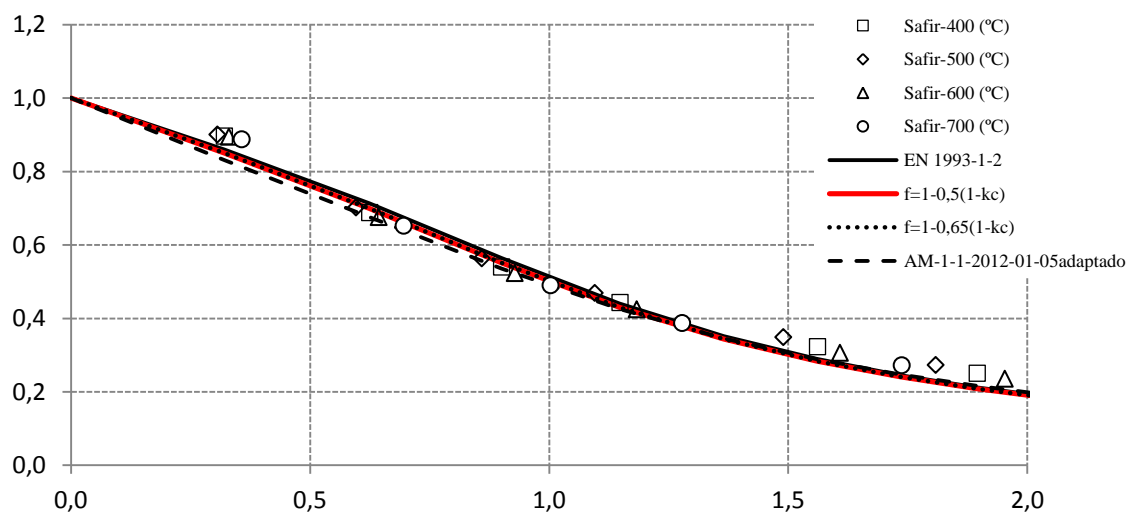
IPE 220 Laminado S 355

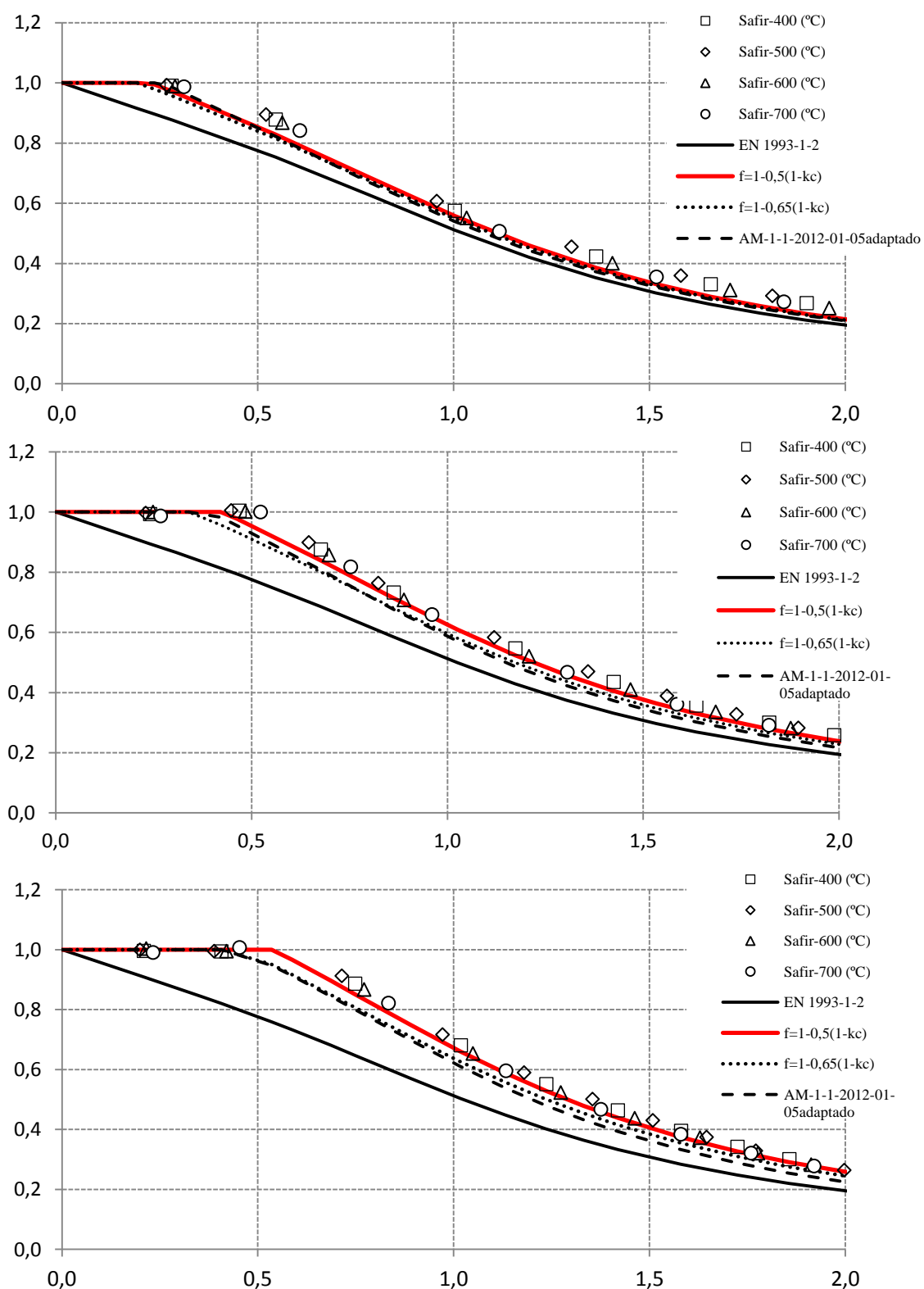


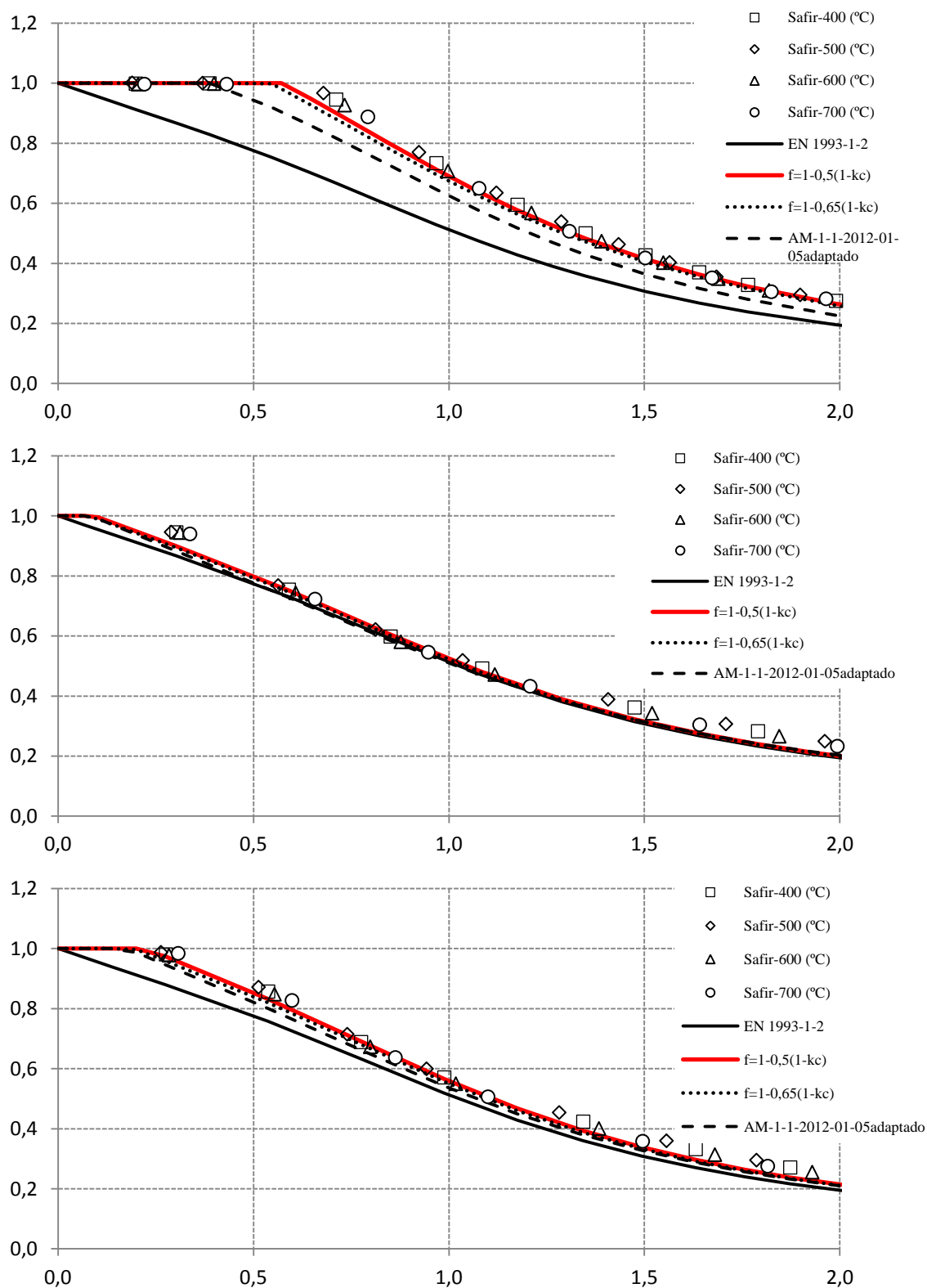




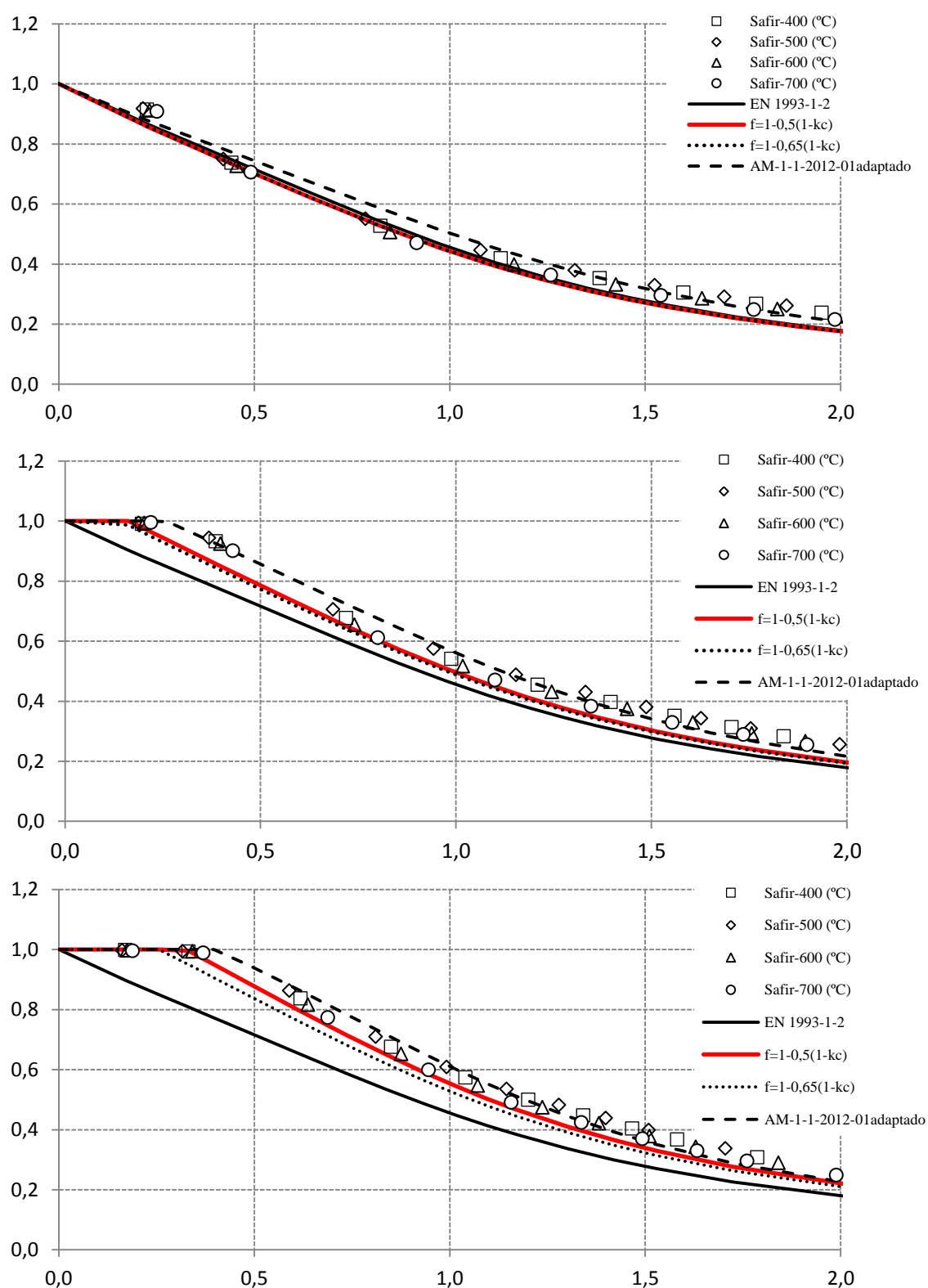
IPE 220 Laminado S 460

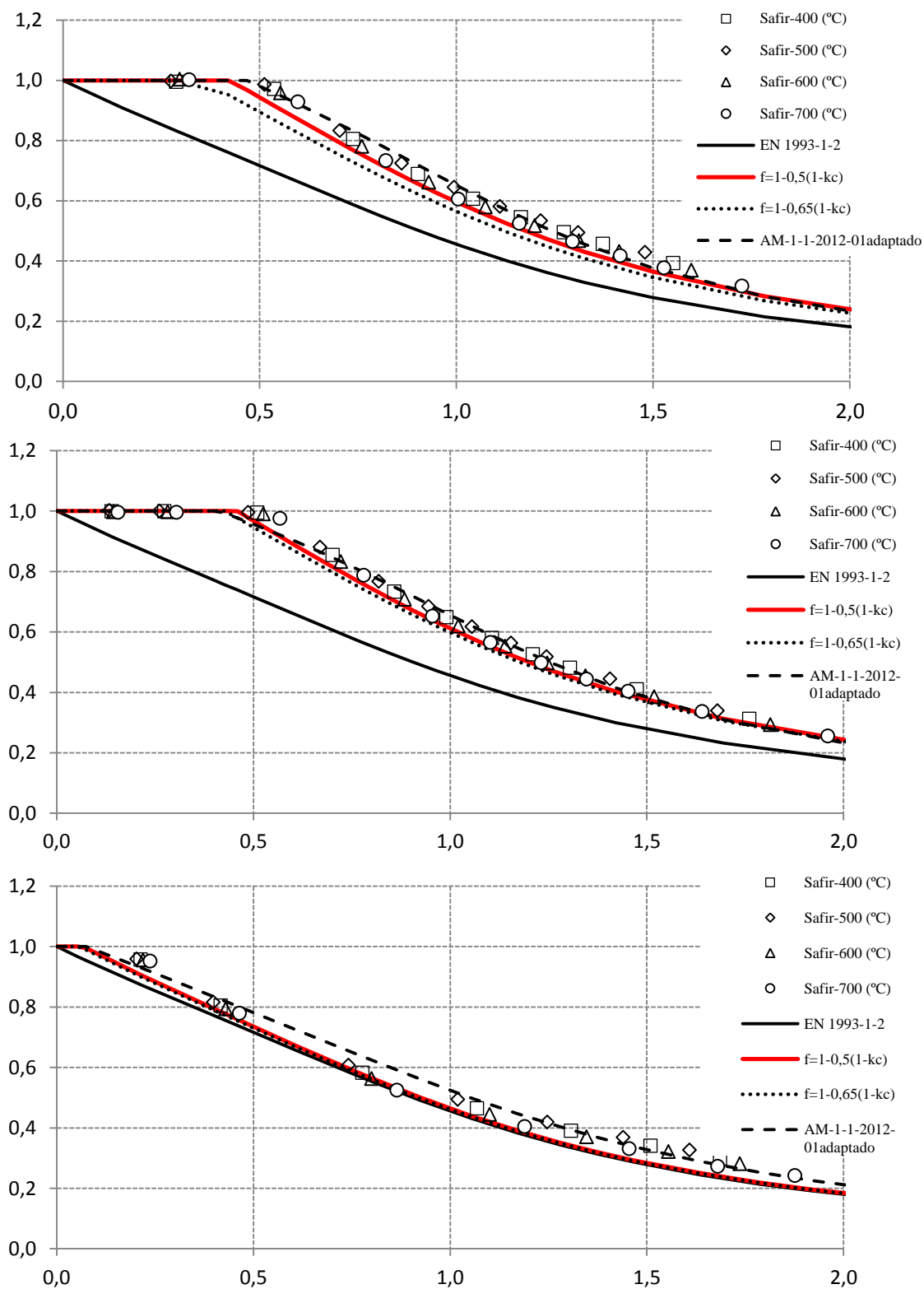


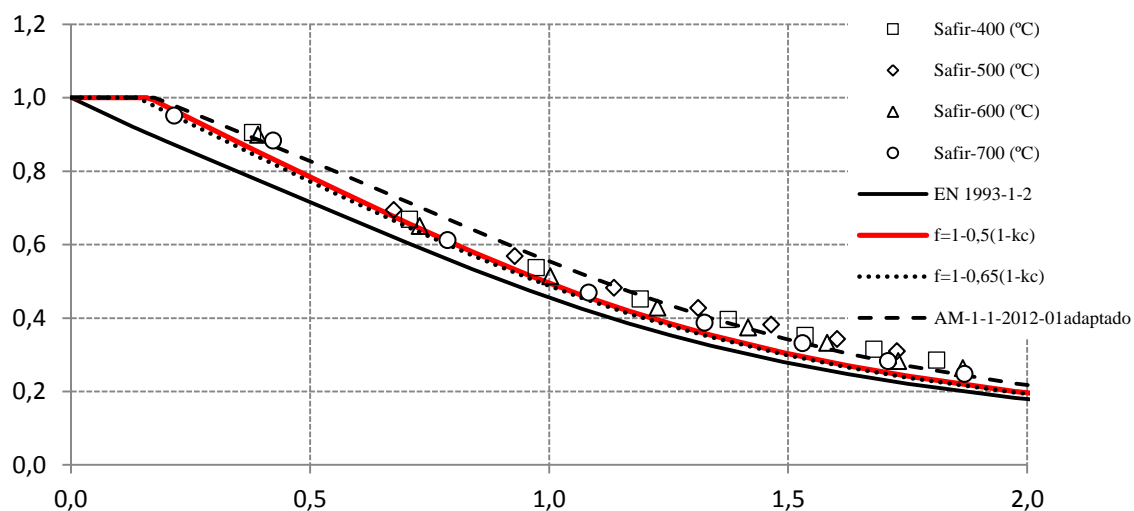




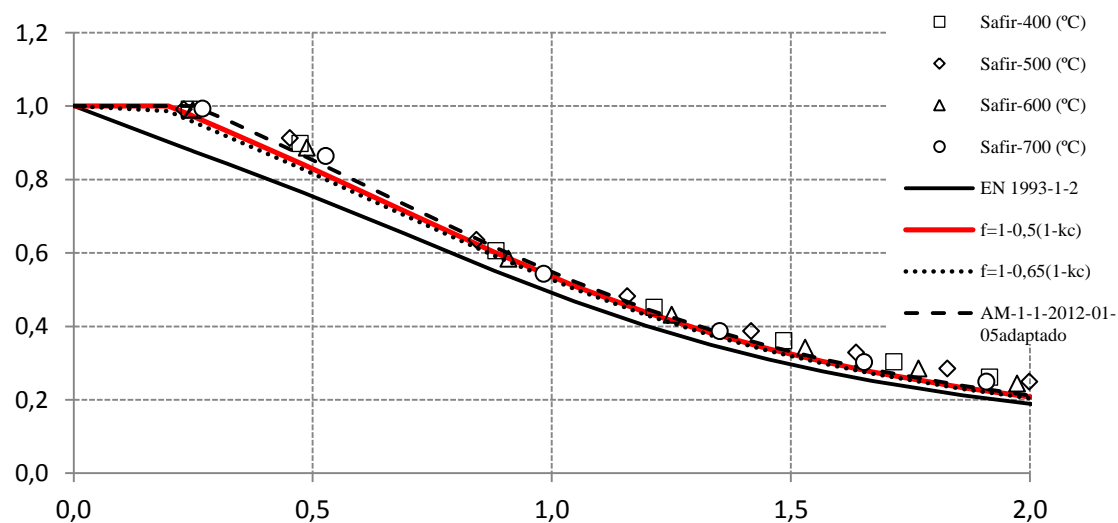
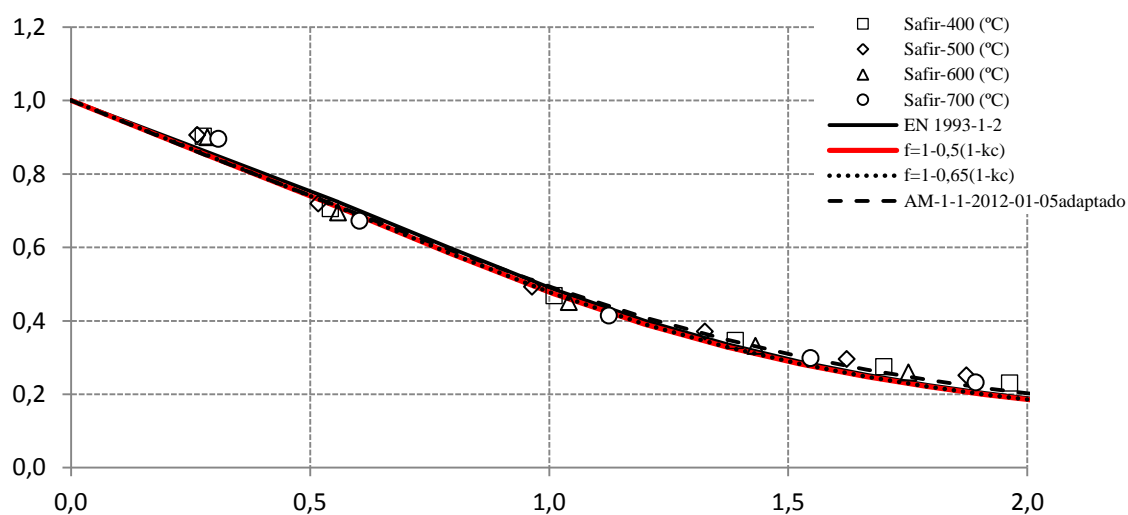
IPE 220 Soldado S 235

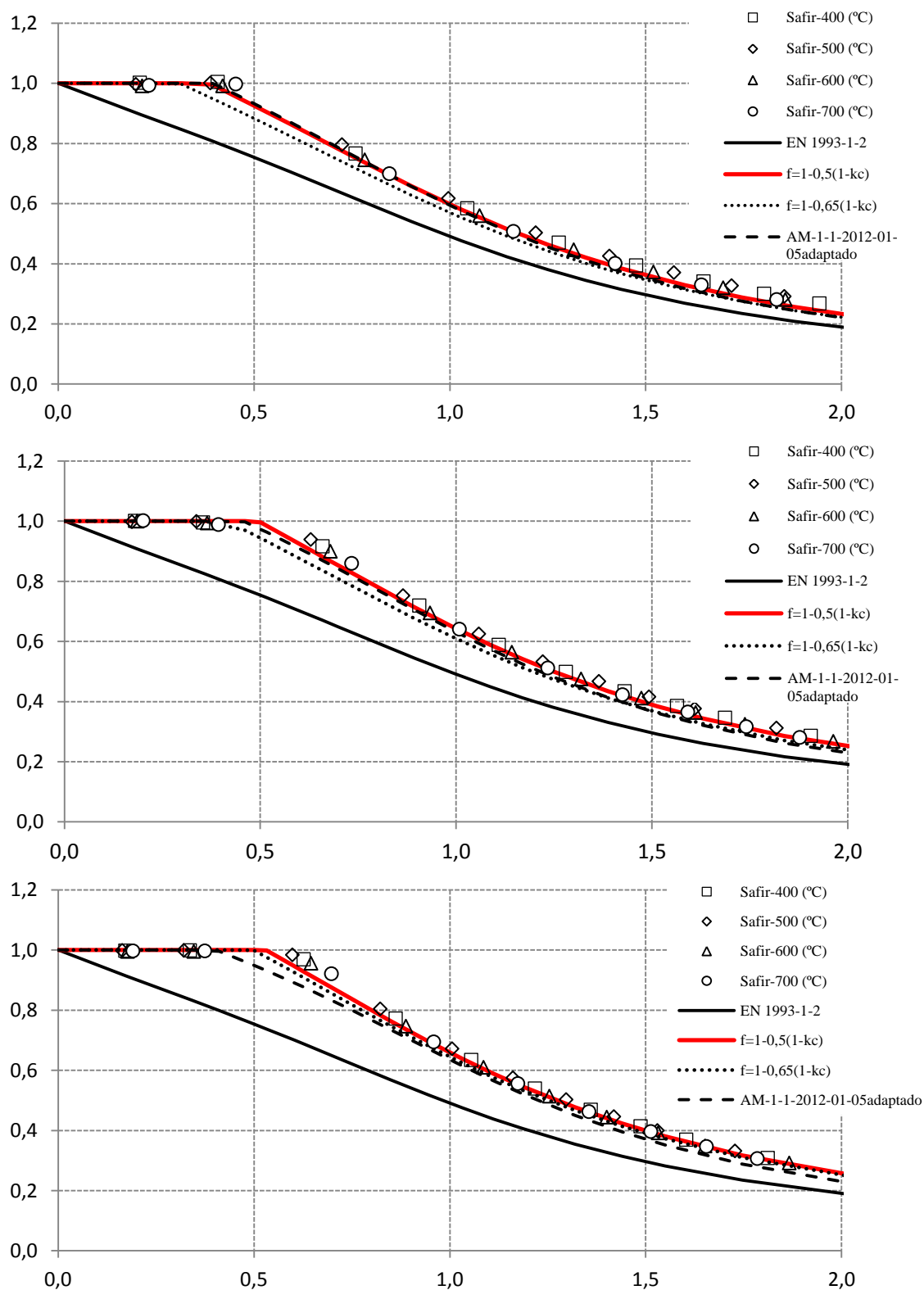


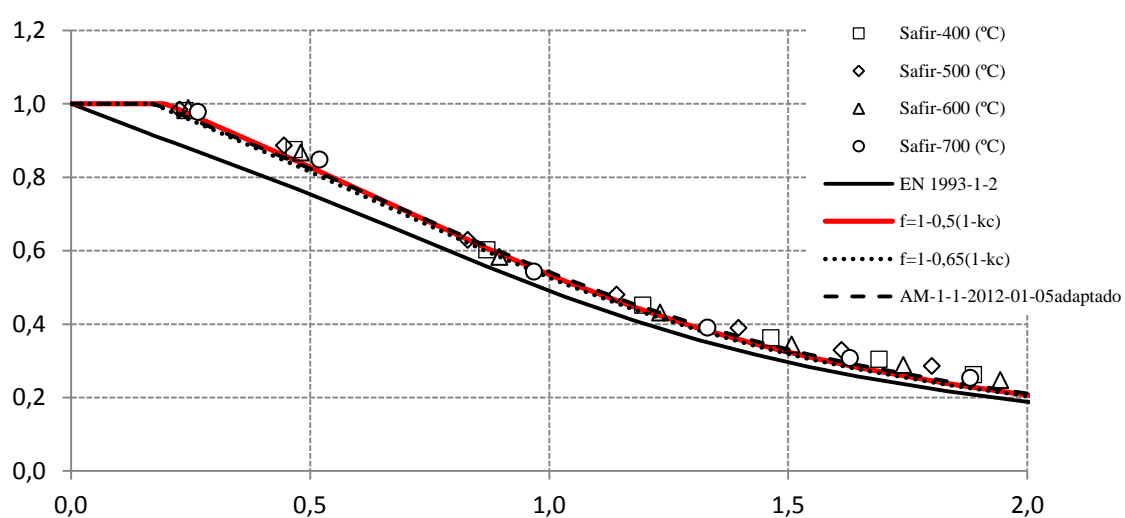
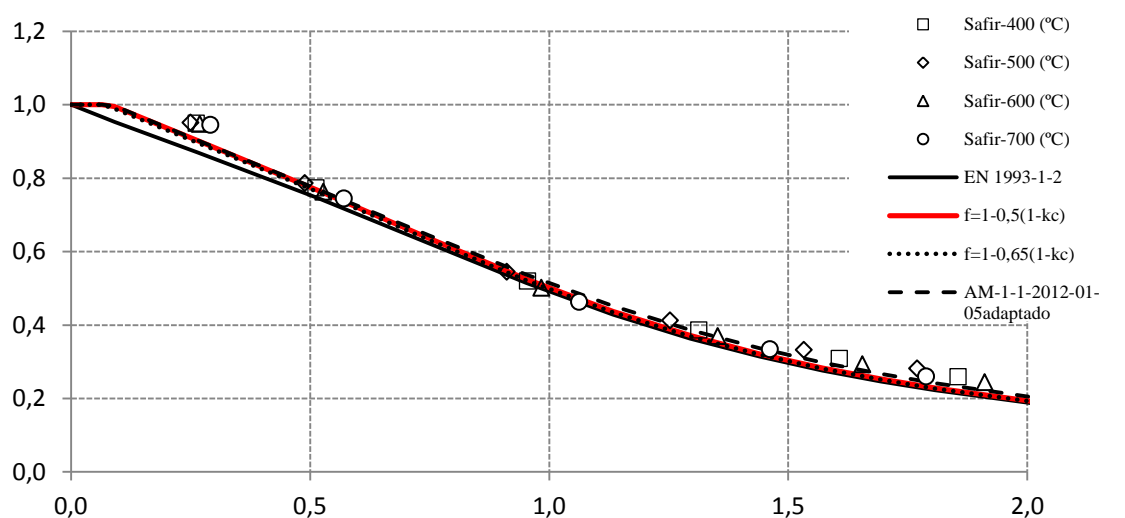




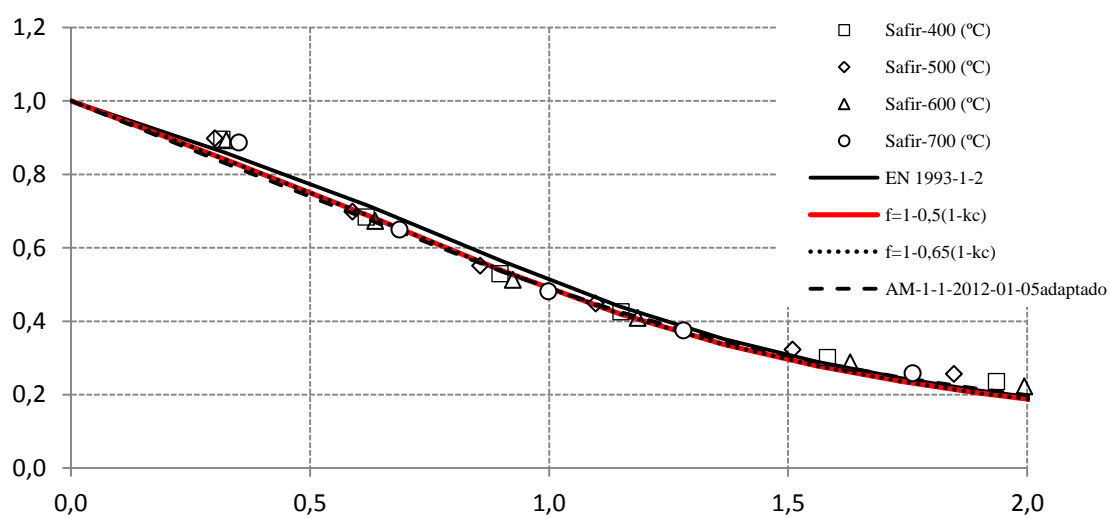
IPE 220 Soldado S355

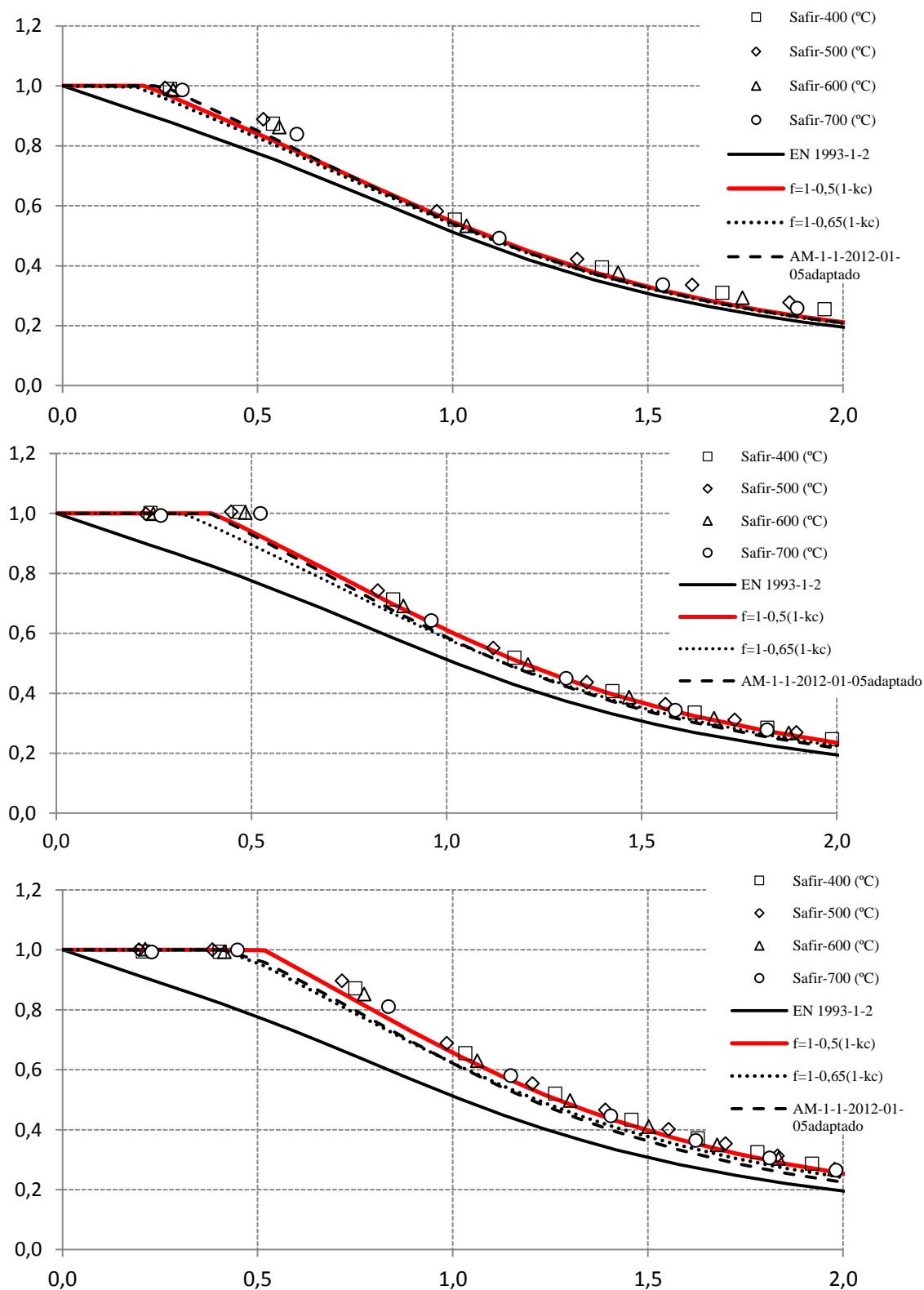


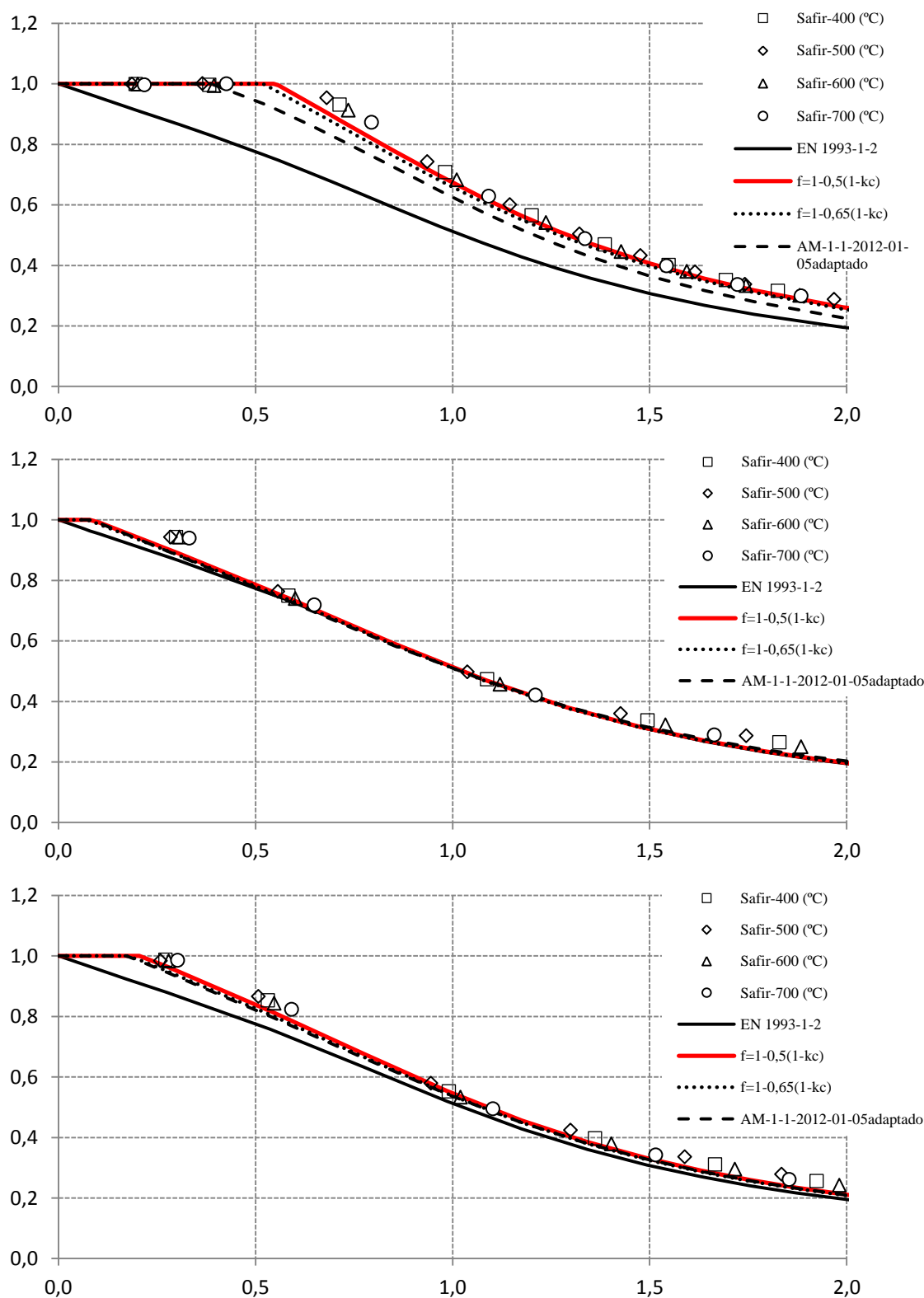




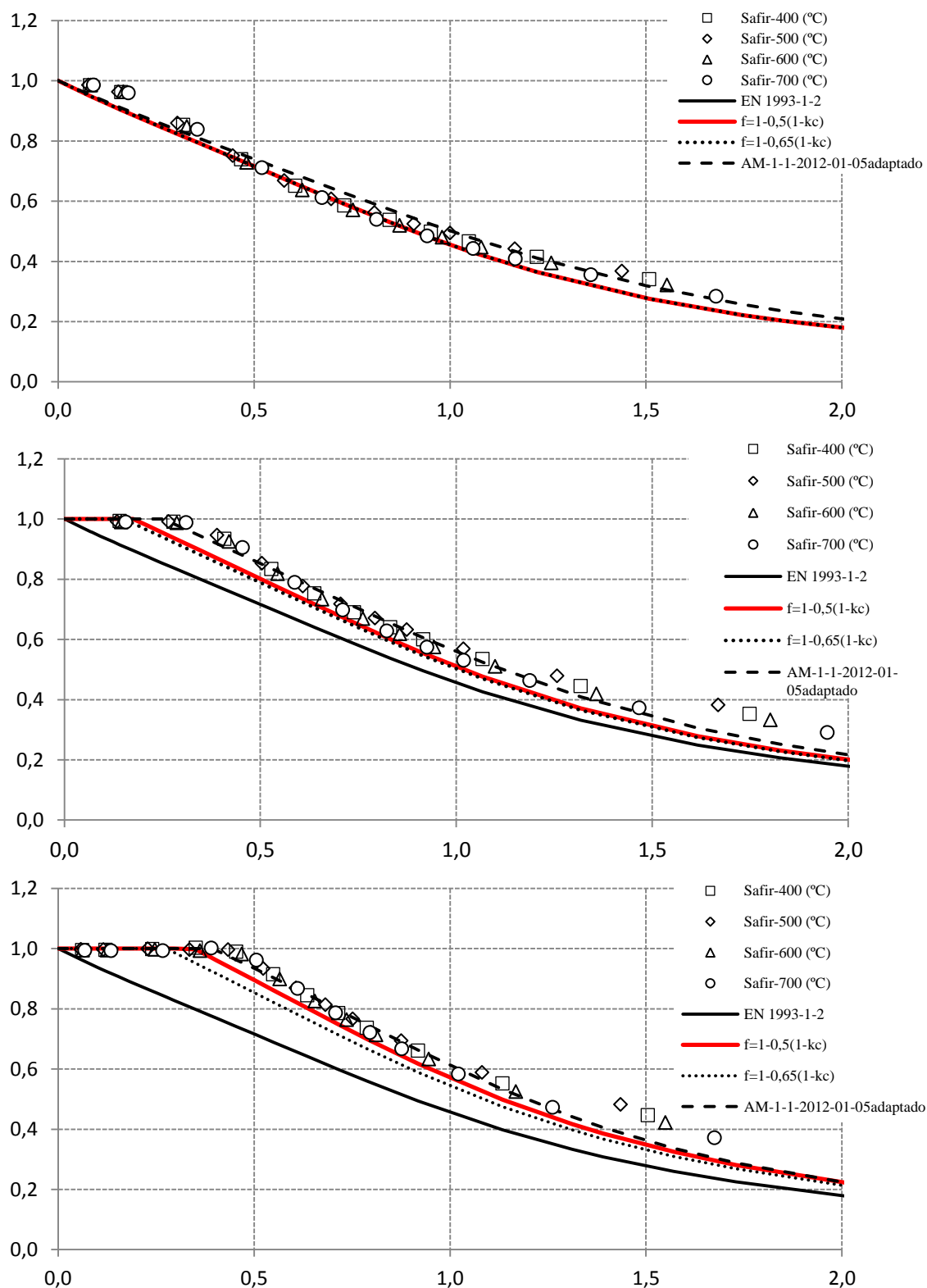
IPE 220 Soldado S 460

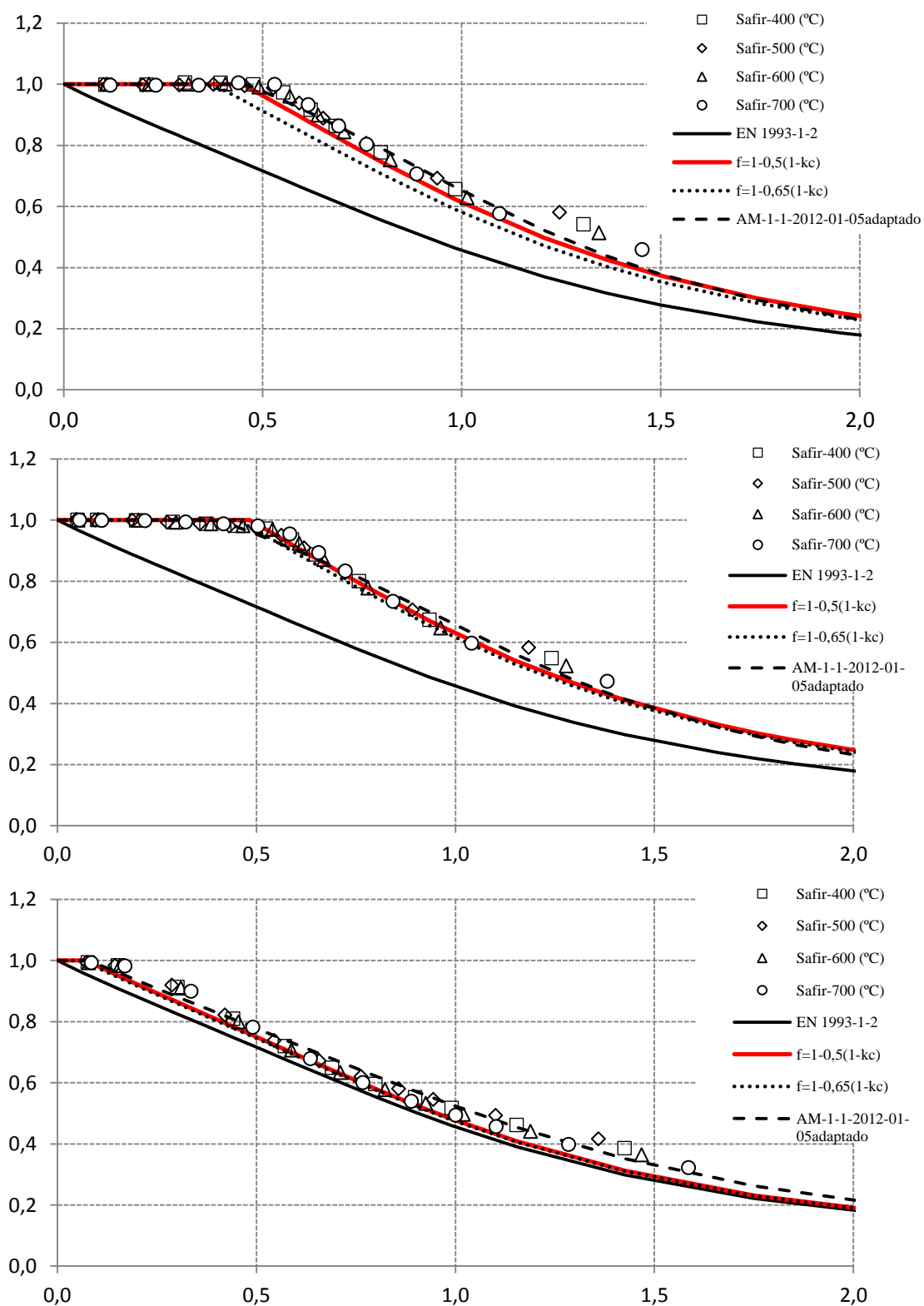


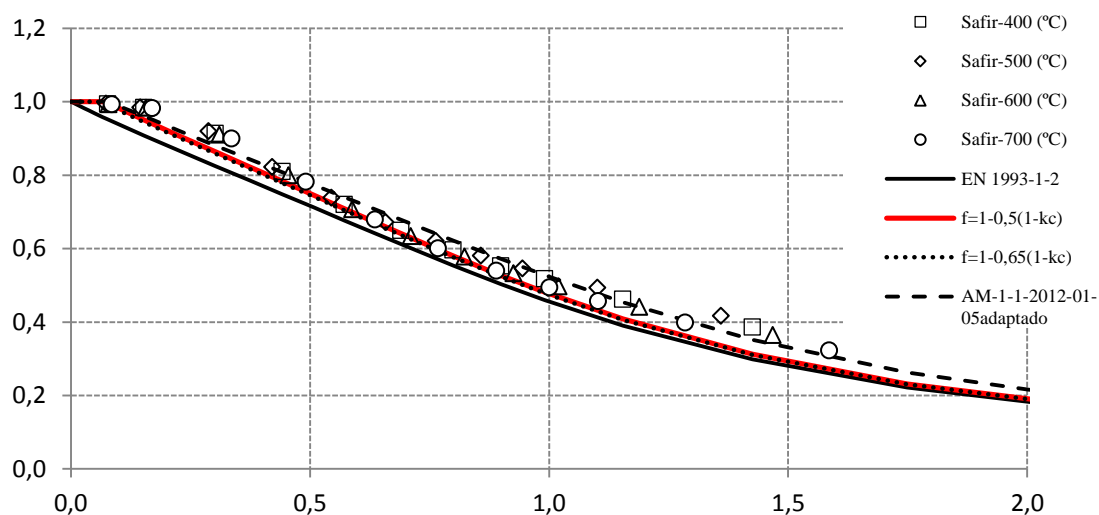




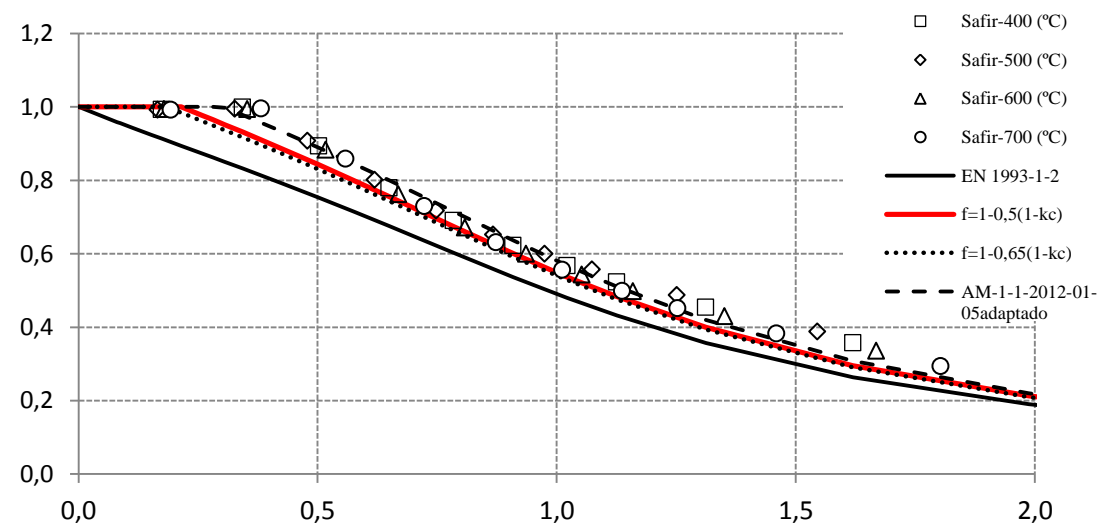
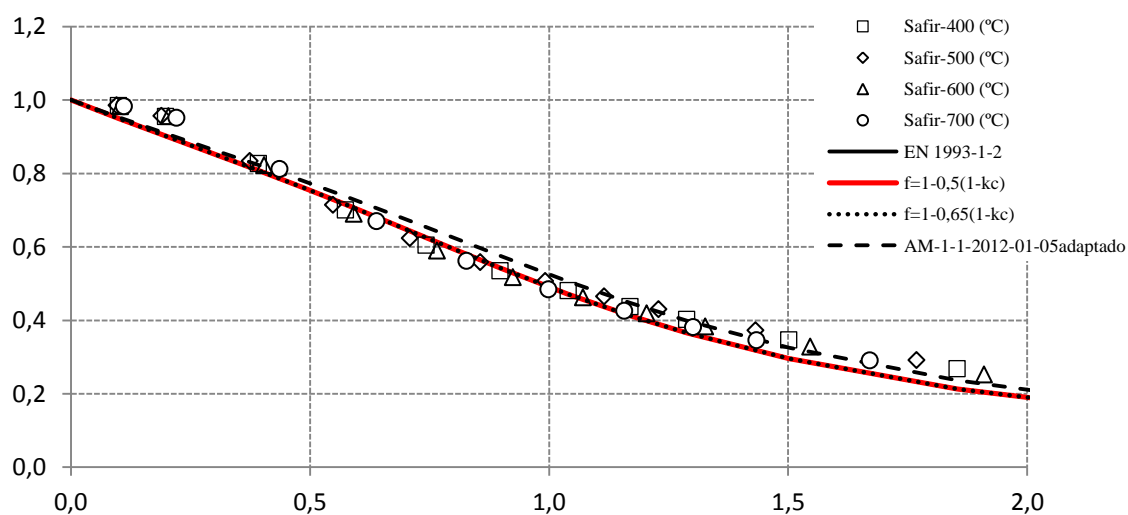
HEA 500 Laminado S 235

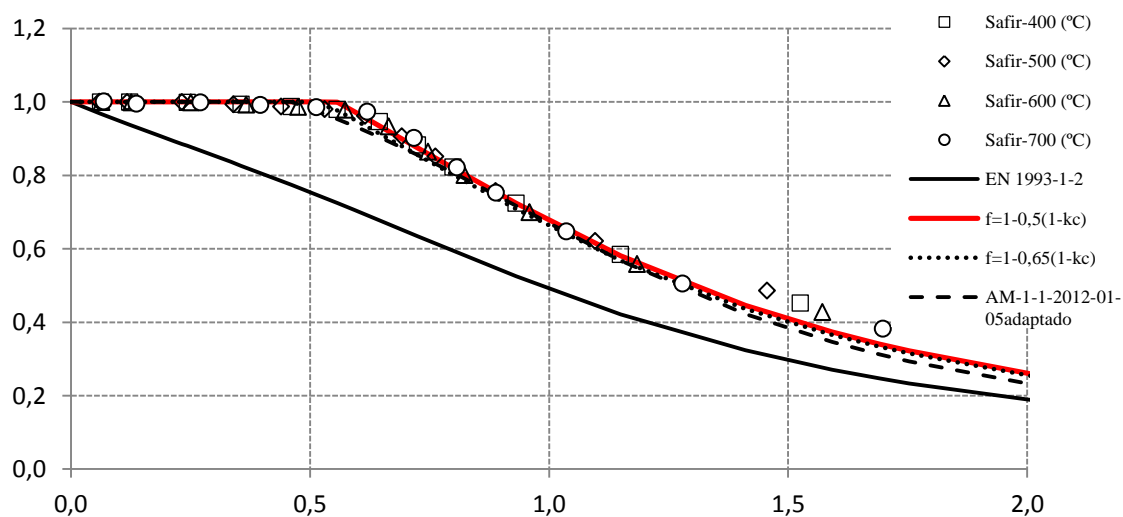
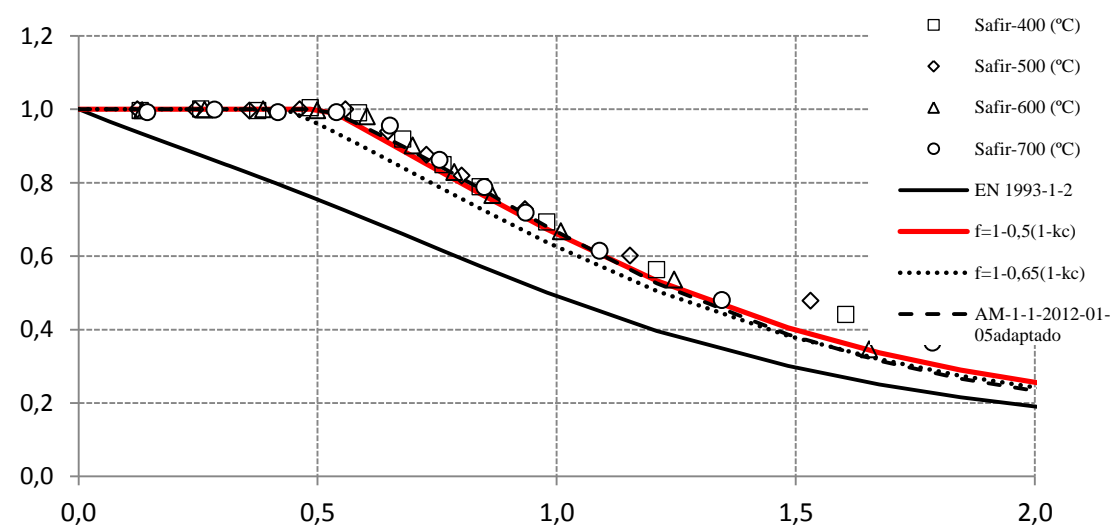
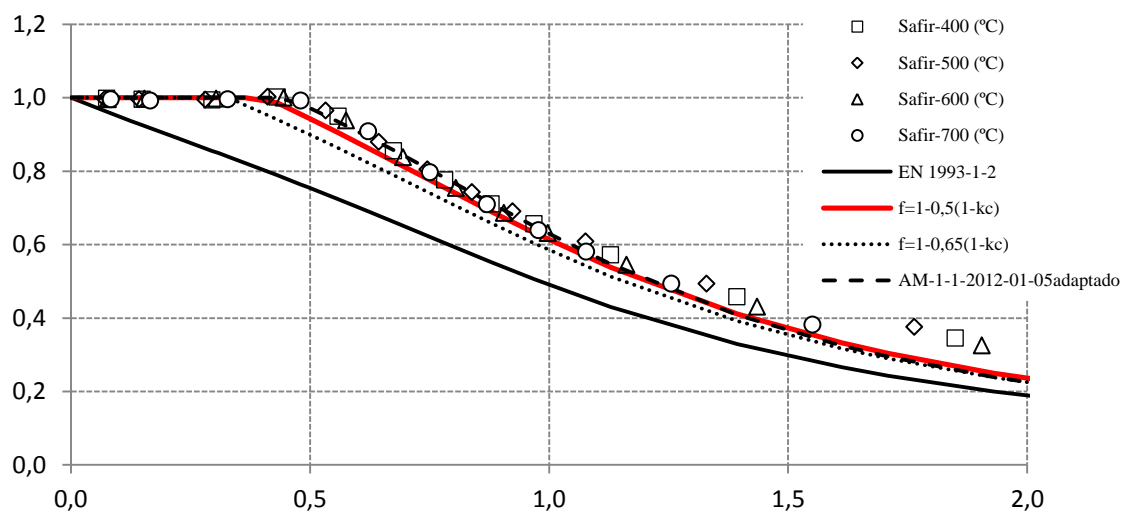


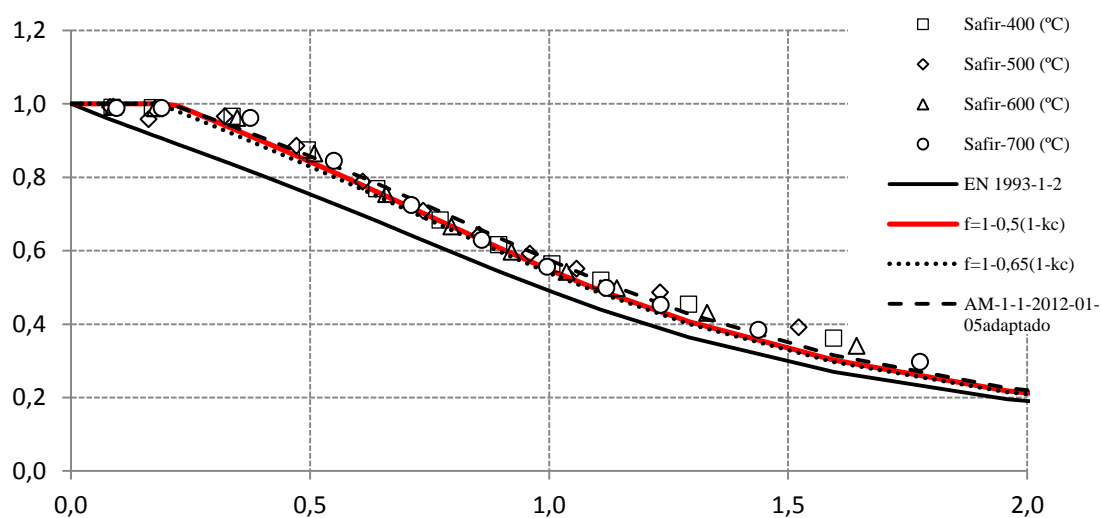
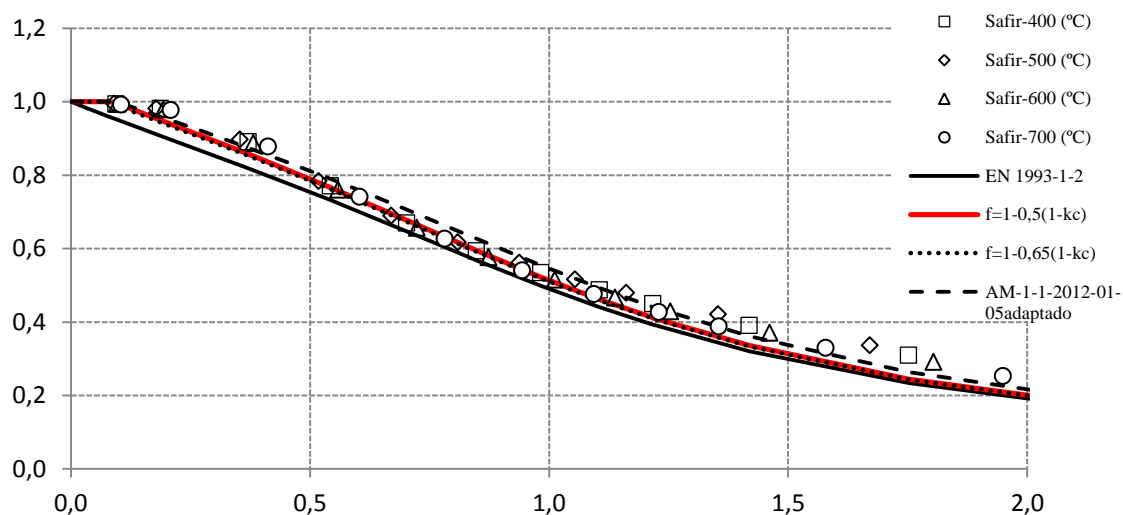




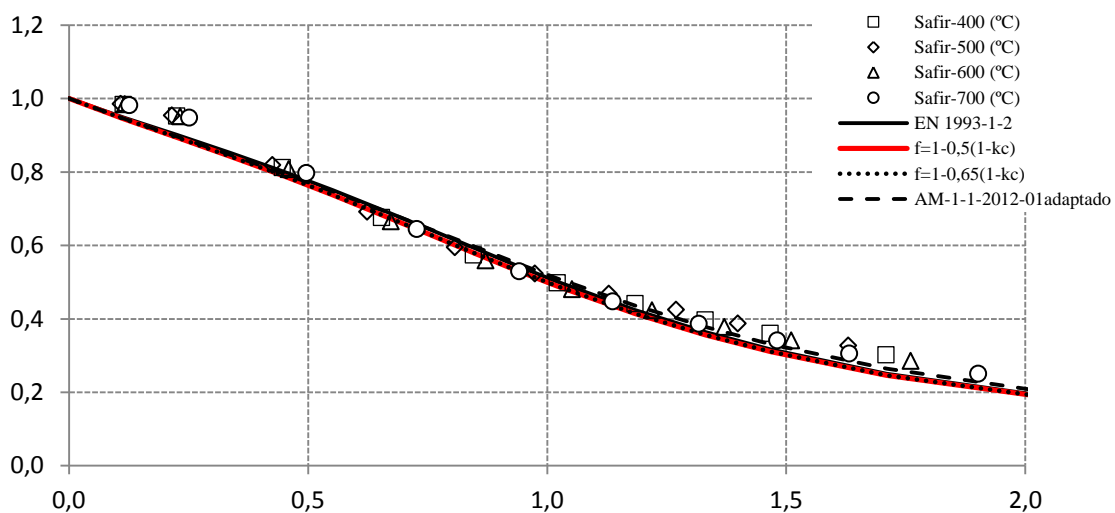
HEA 500 Laminado S 355

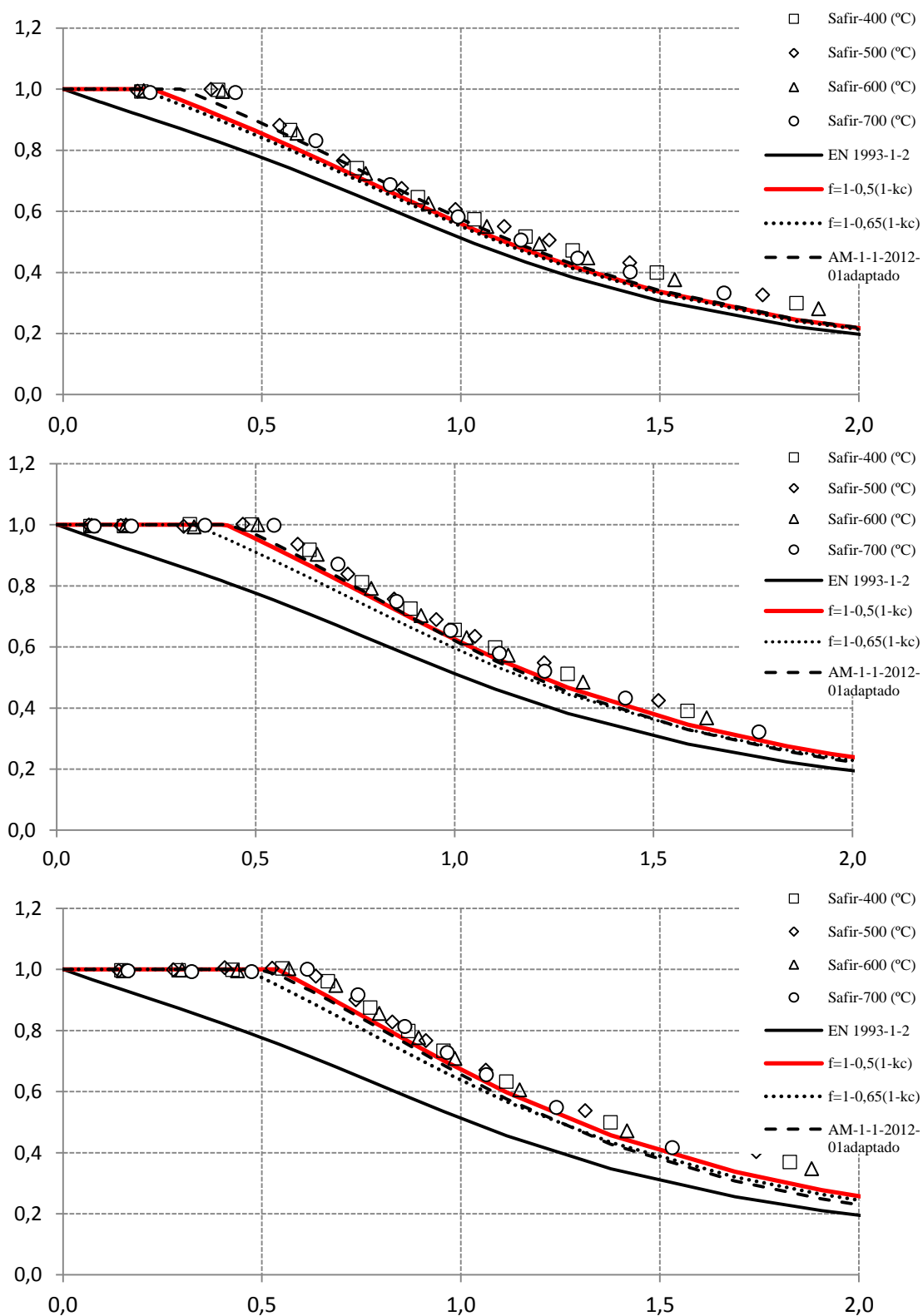


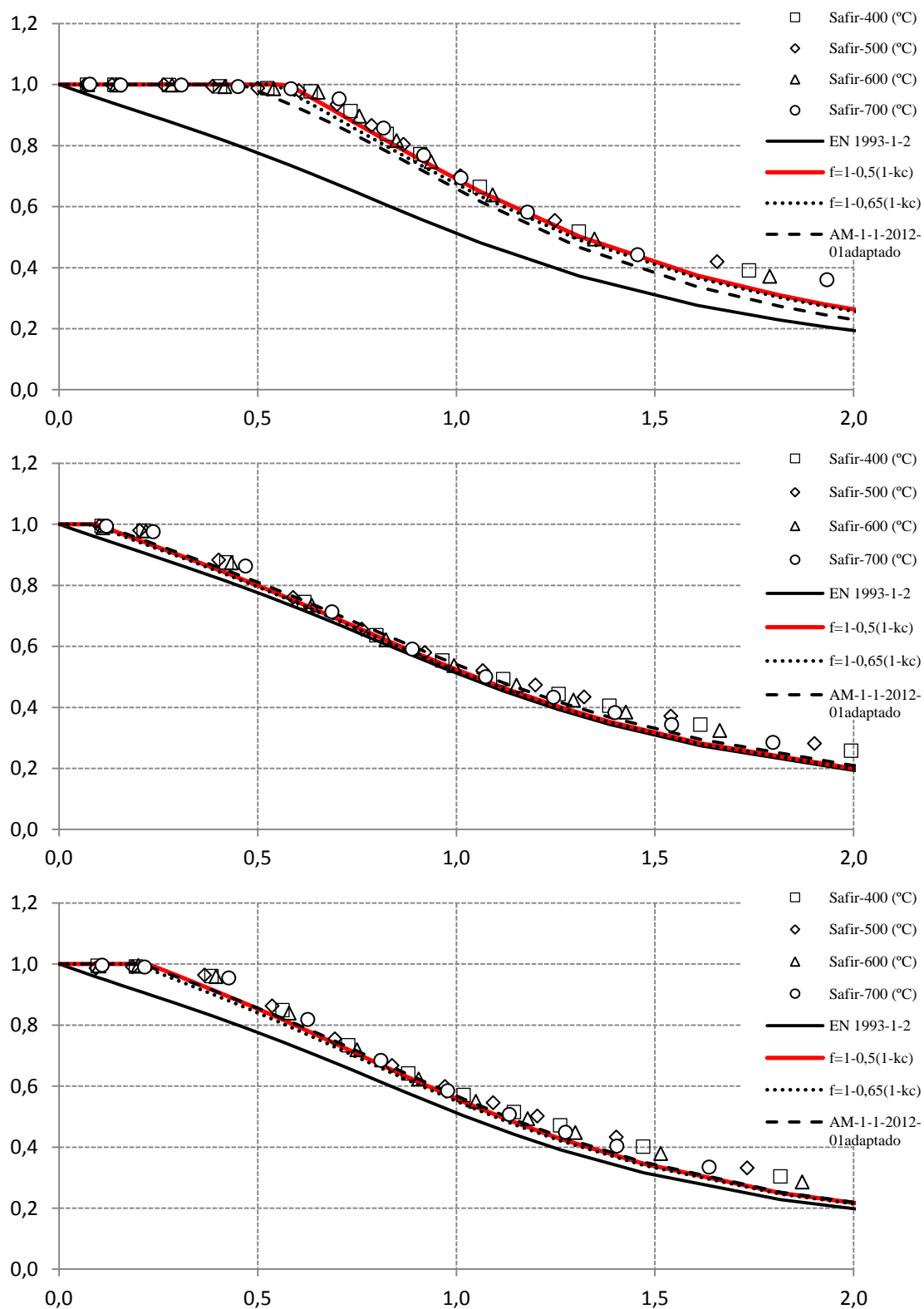




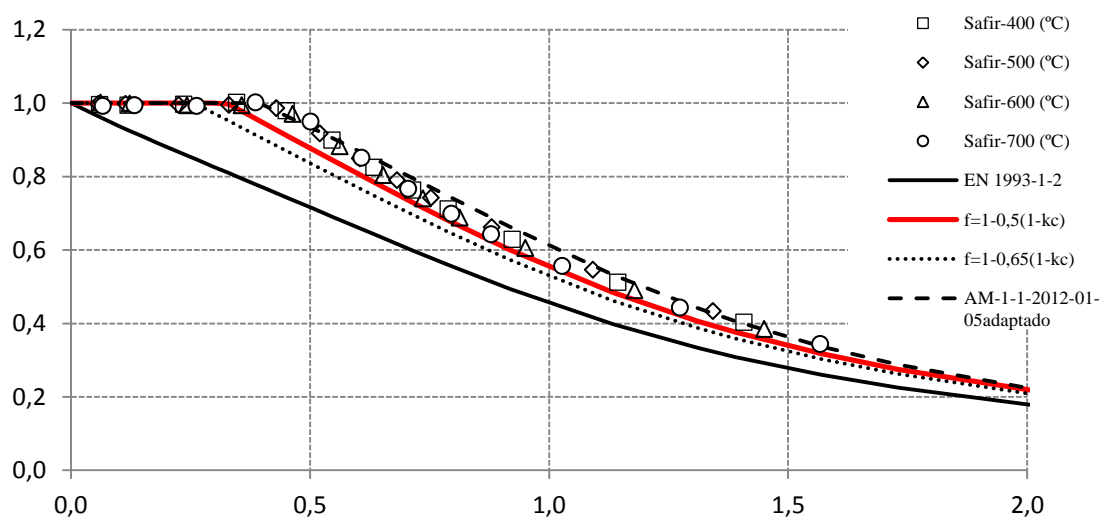
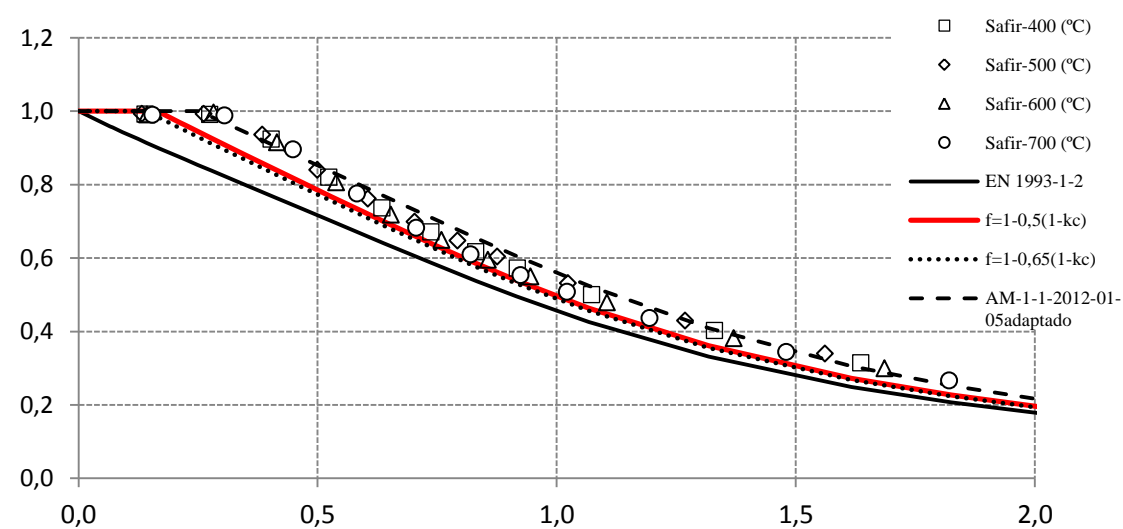
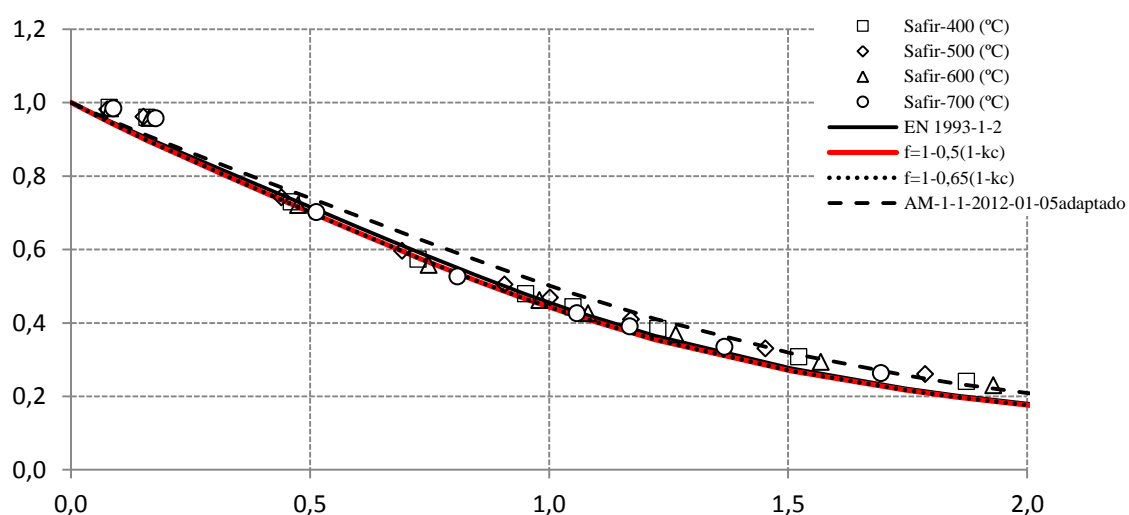
HEA 500 Laminado S 460

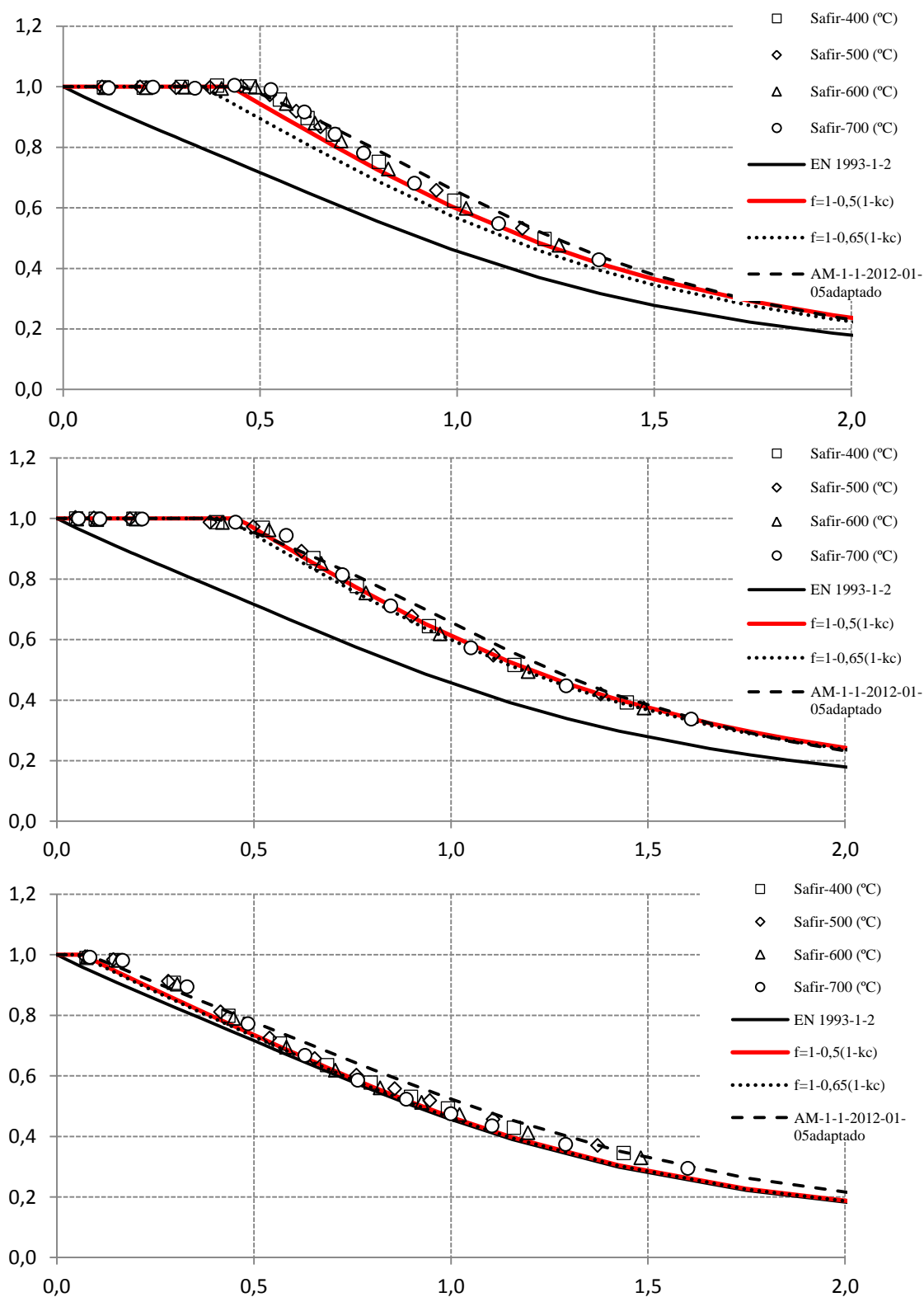


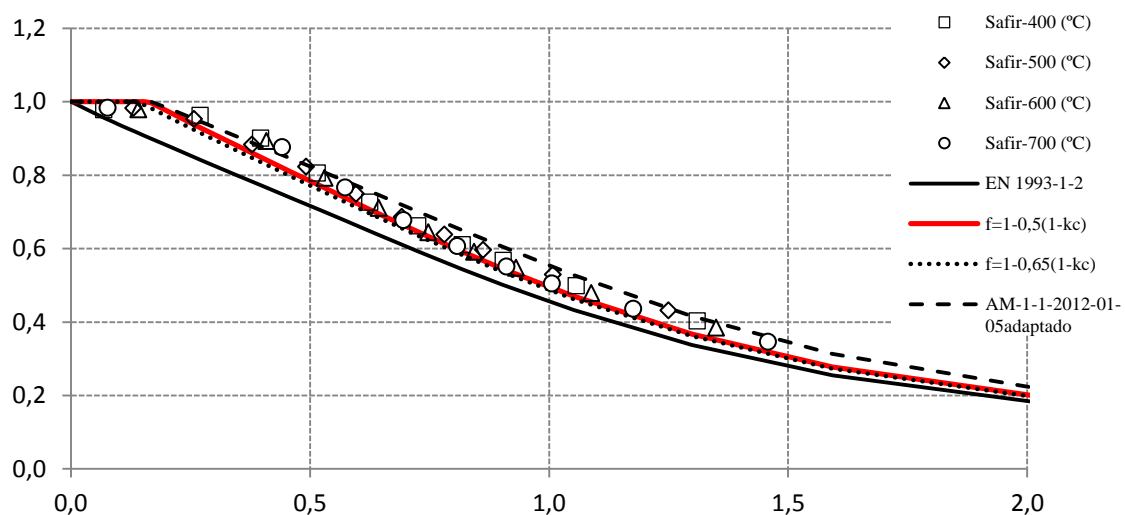




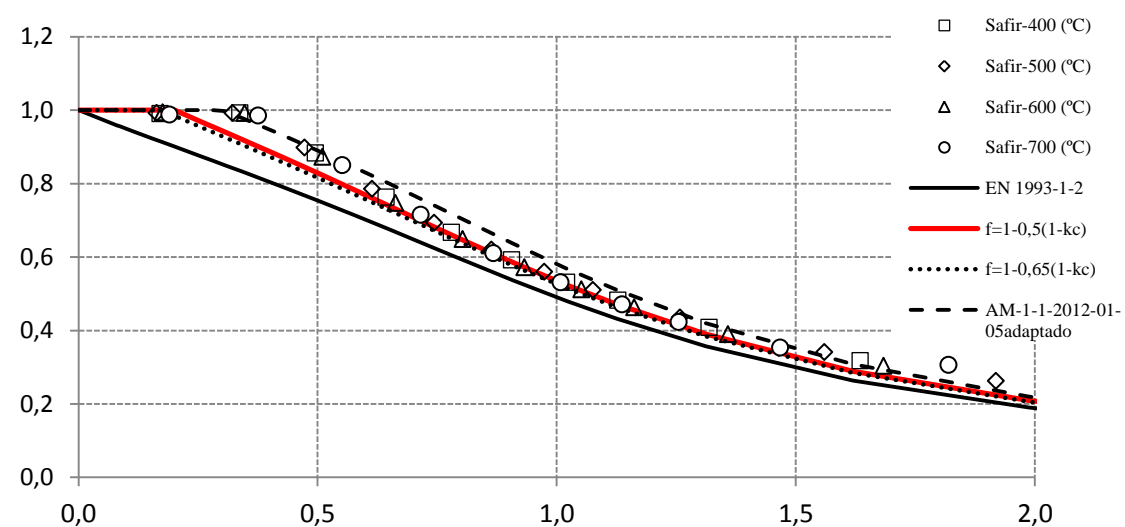
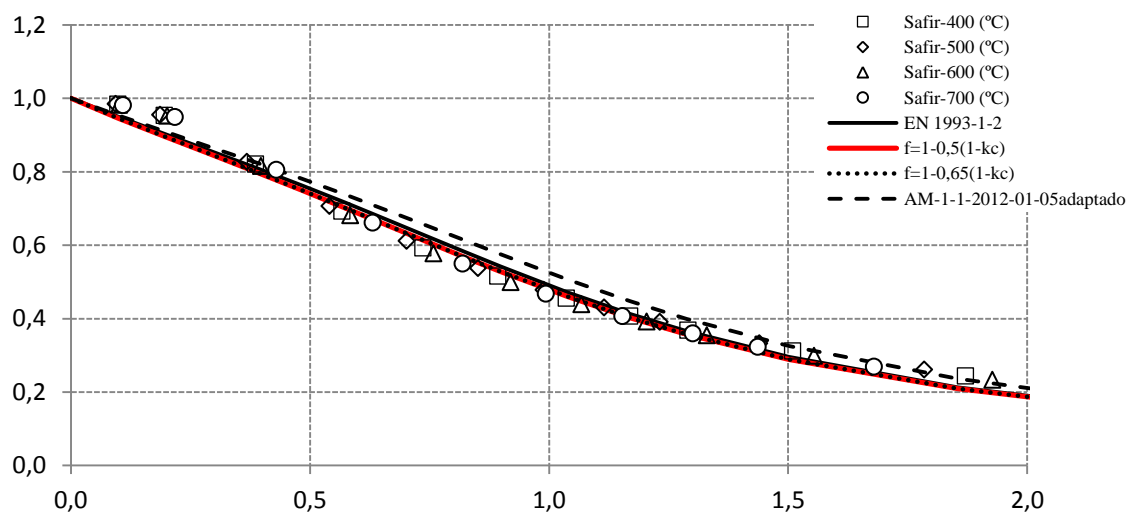
HEA 500 Soldado S 235

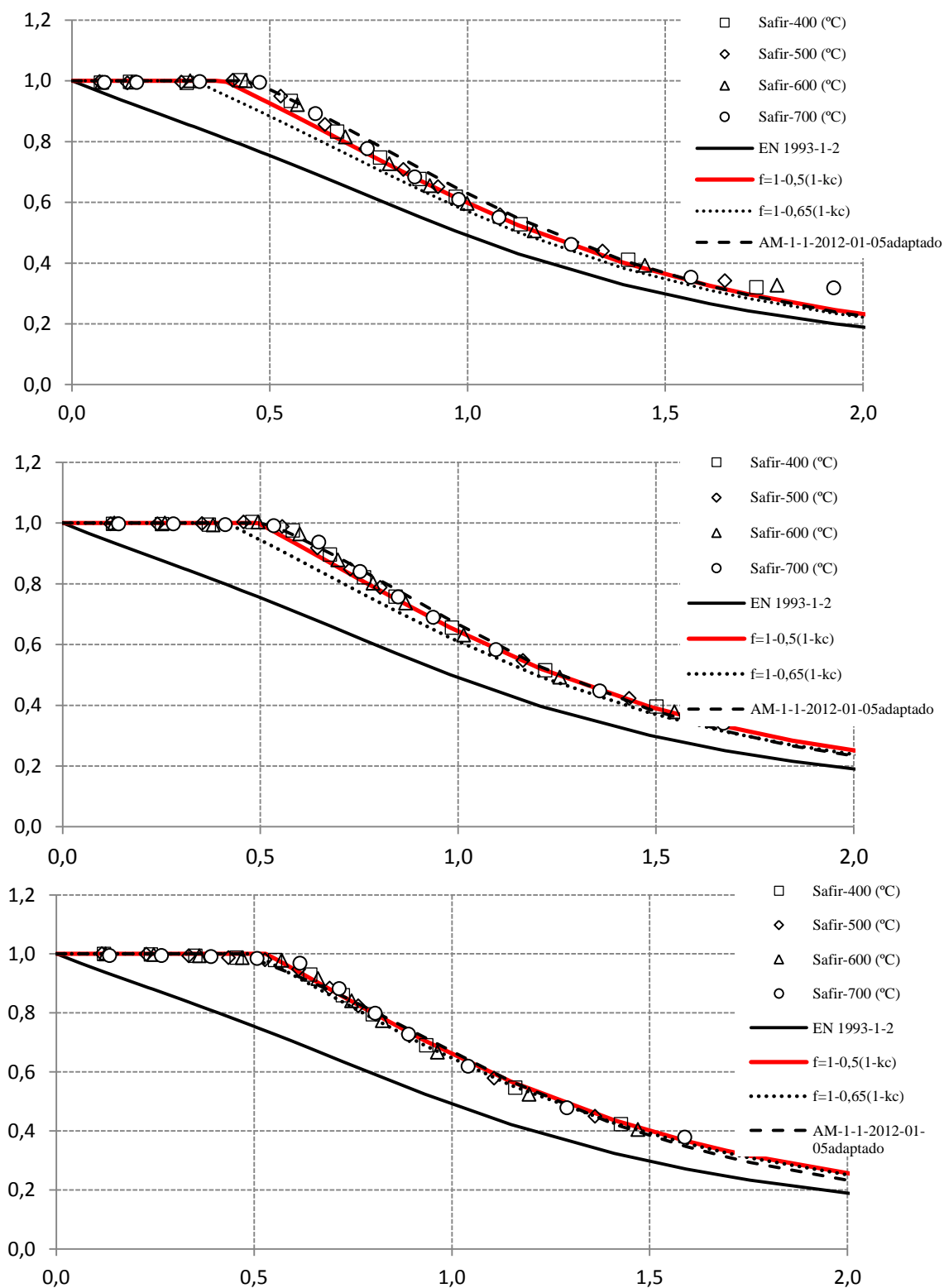


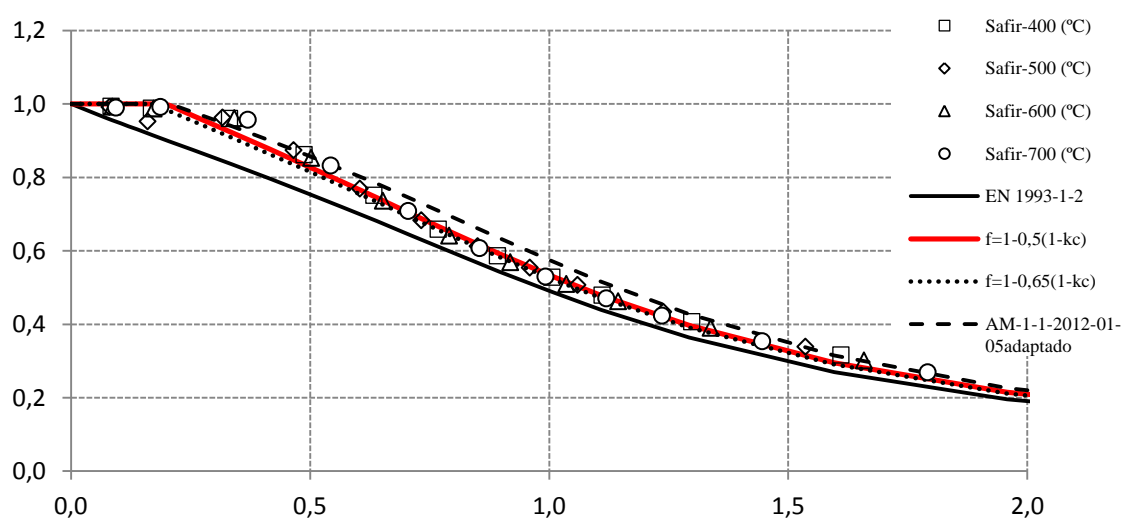
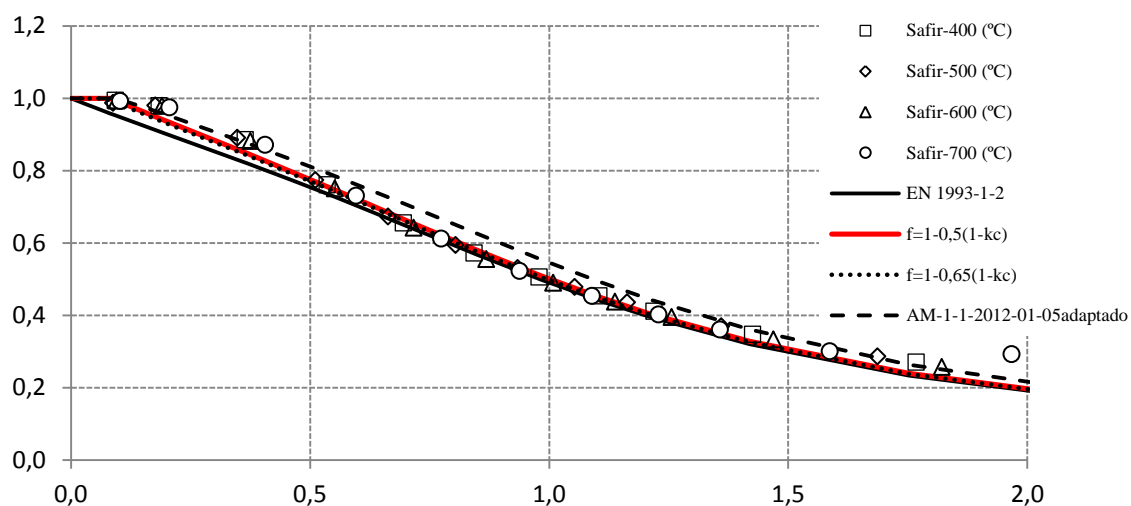




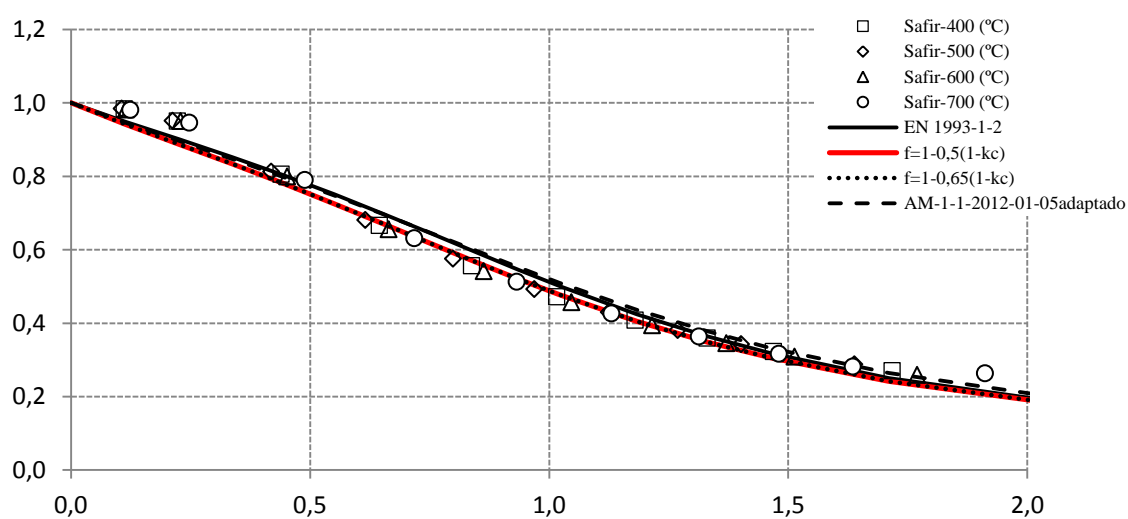
HEA 500 Soldado S 355

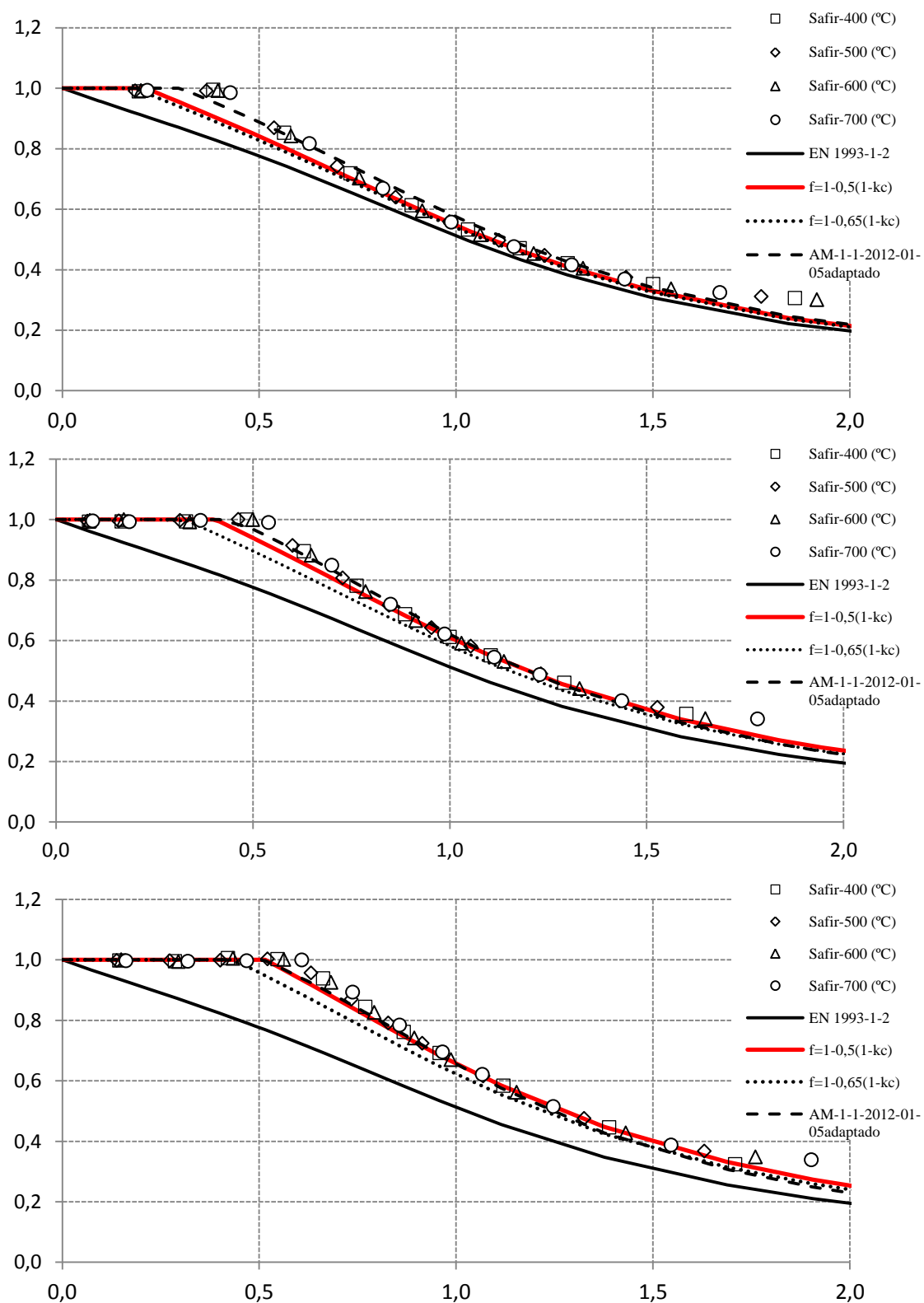


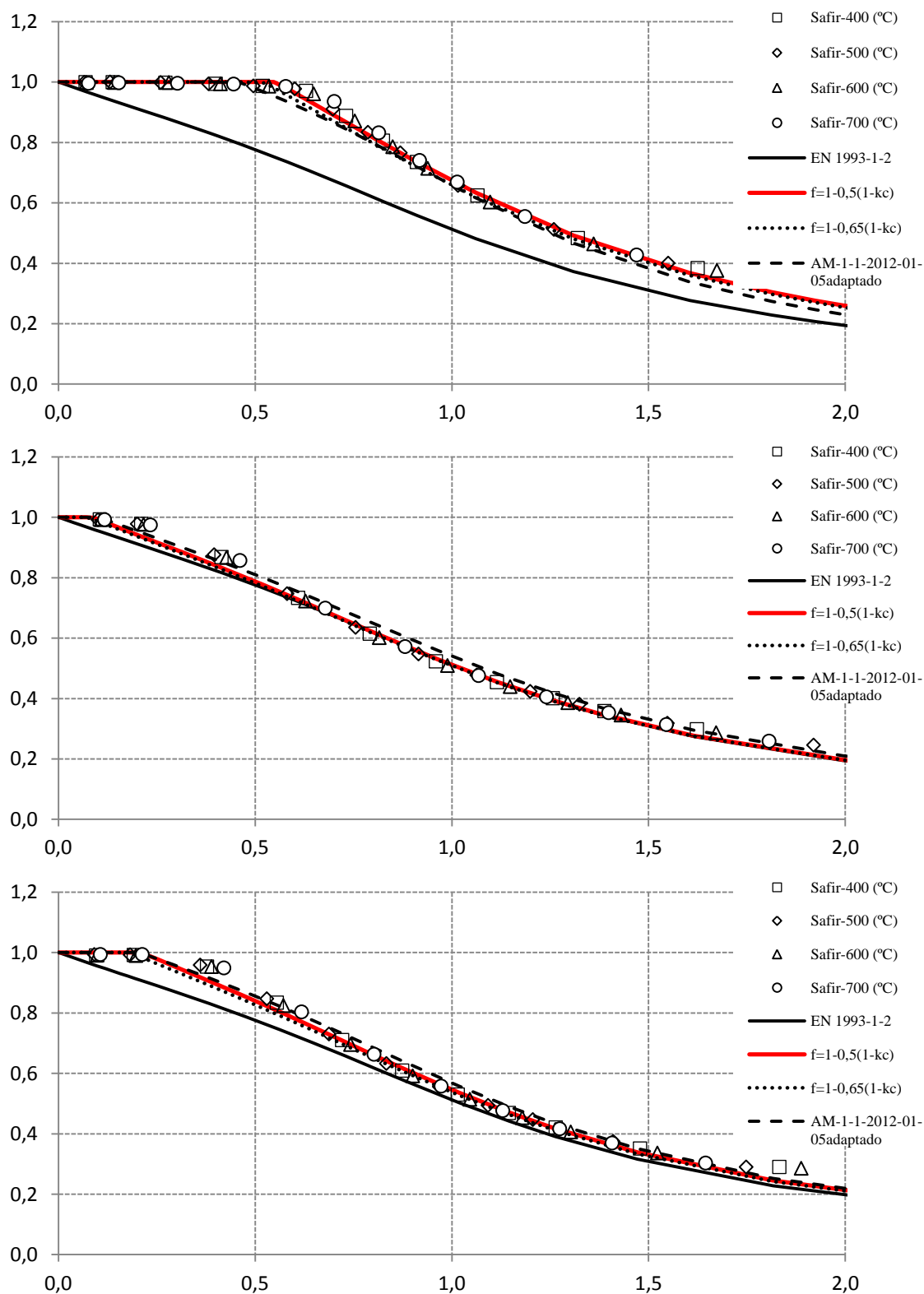




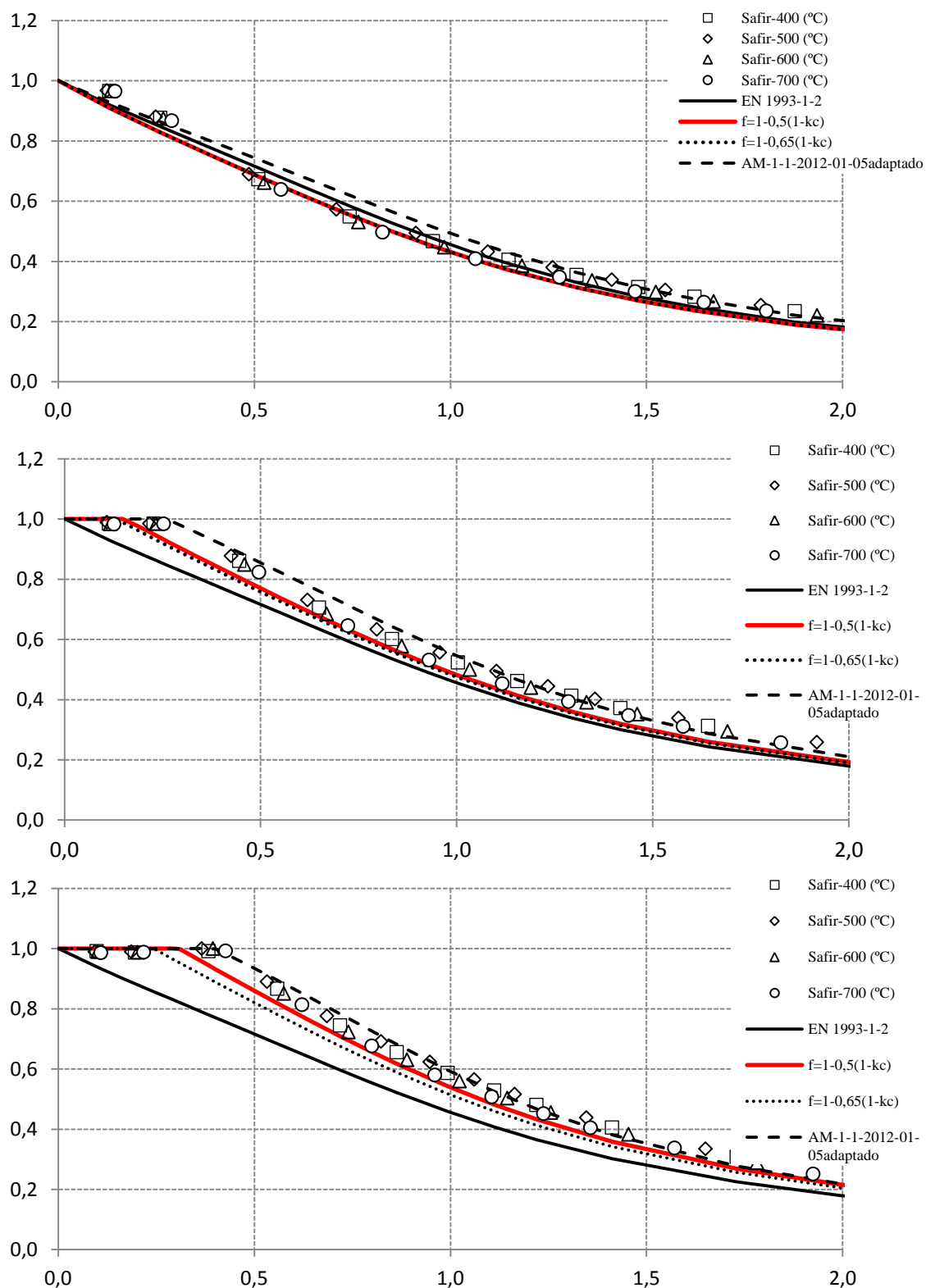
HEA 500 Soldado S 460

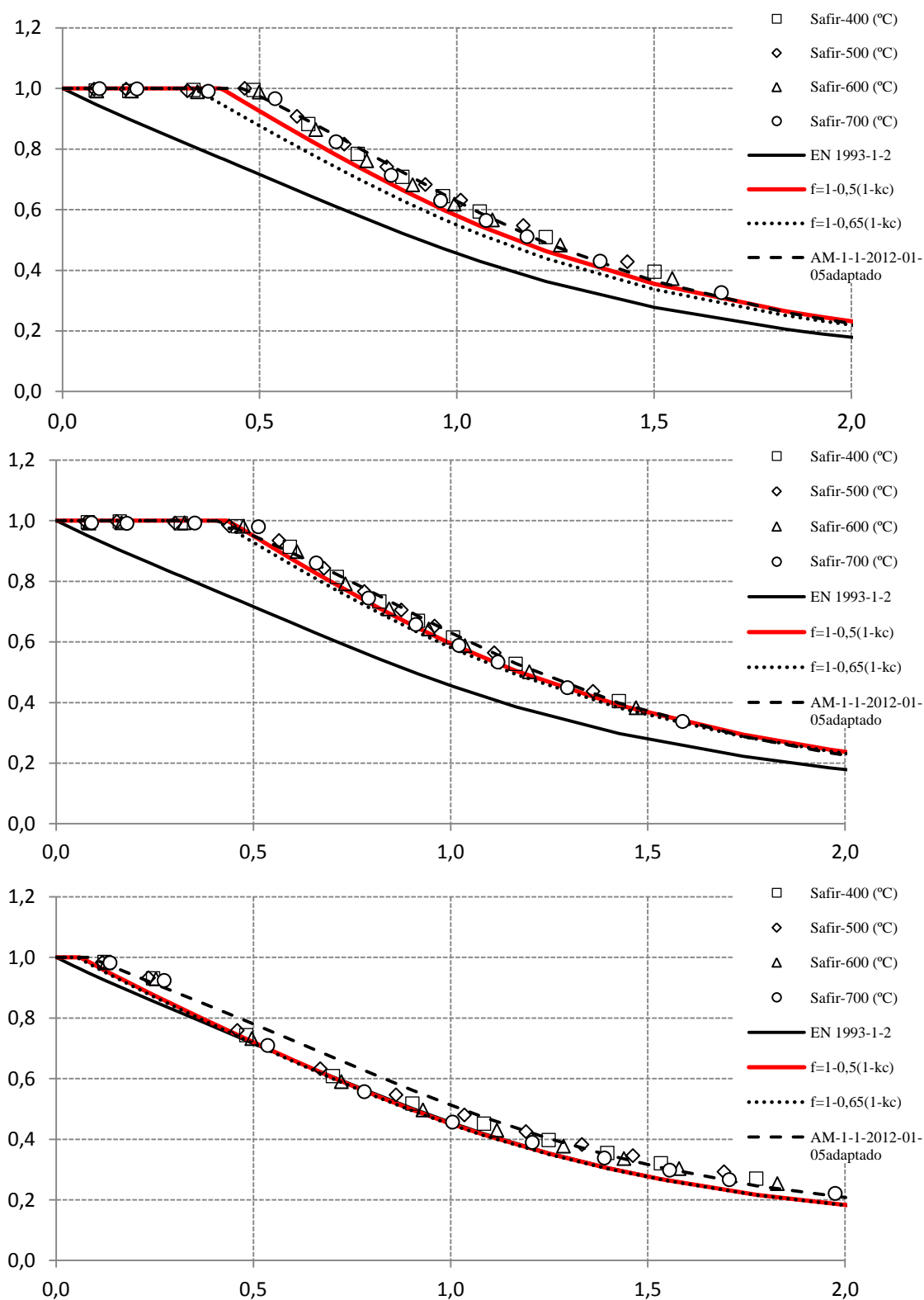


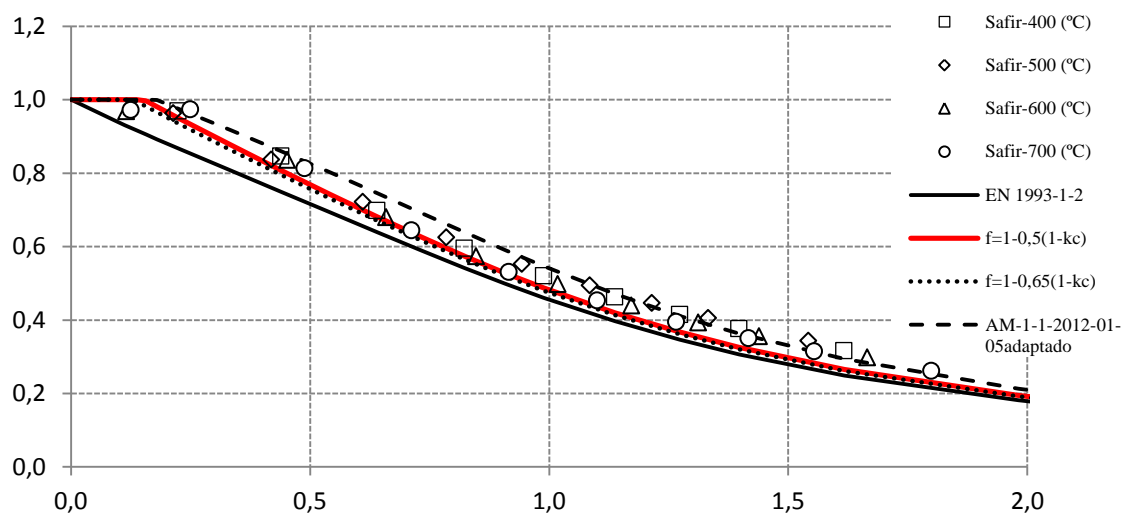




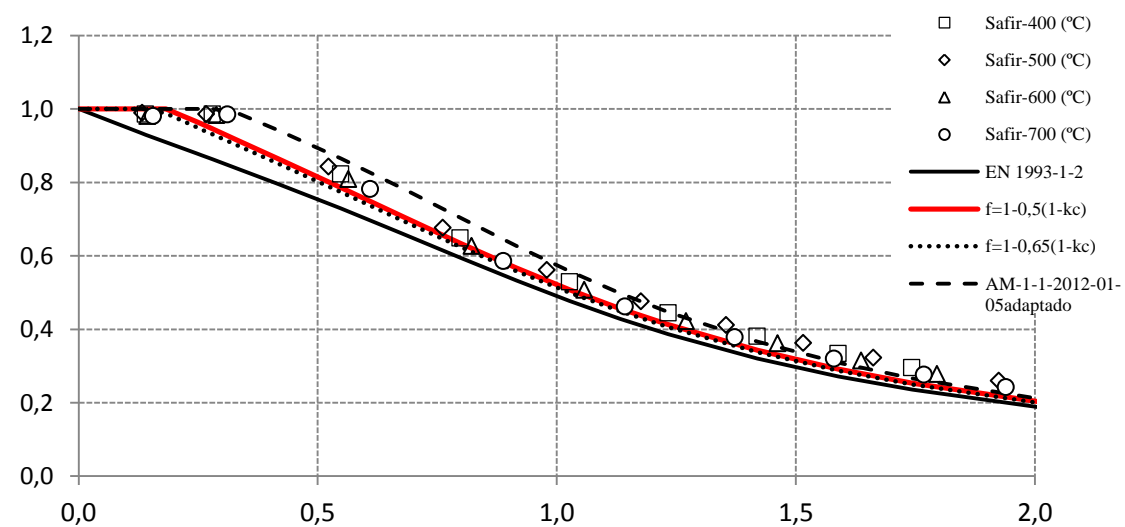
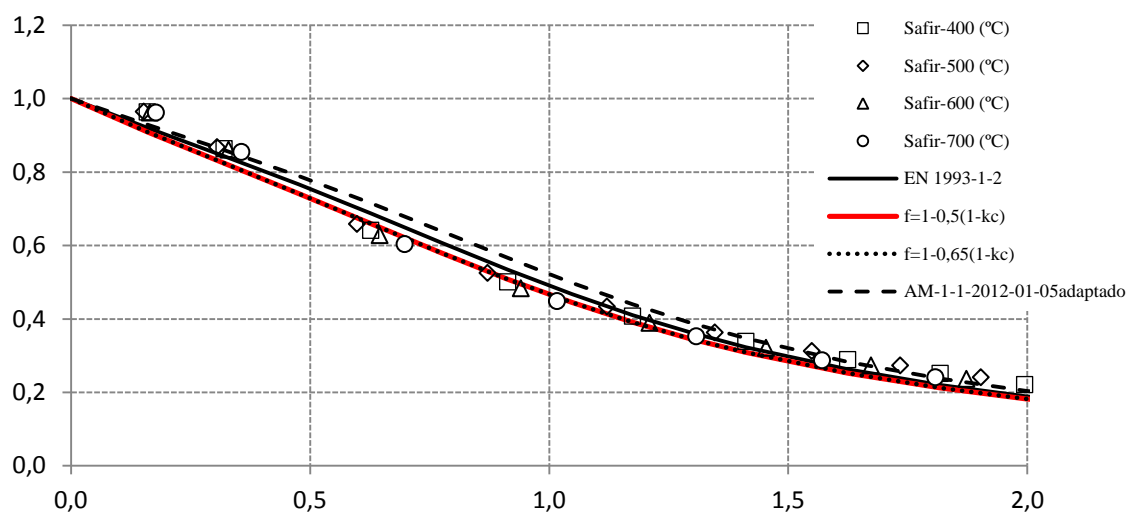
IPE 500 Laminado S 235

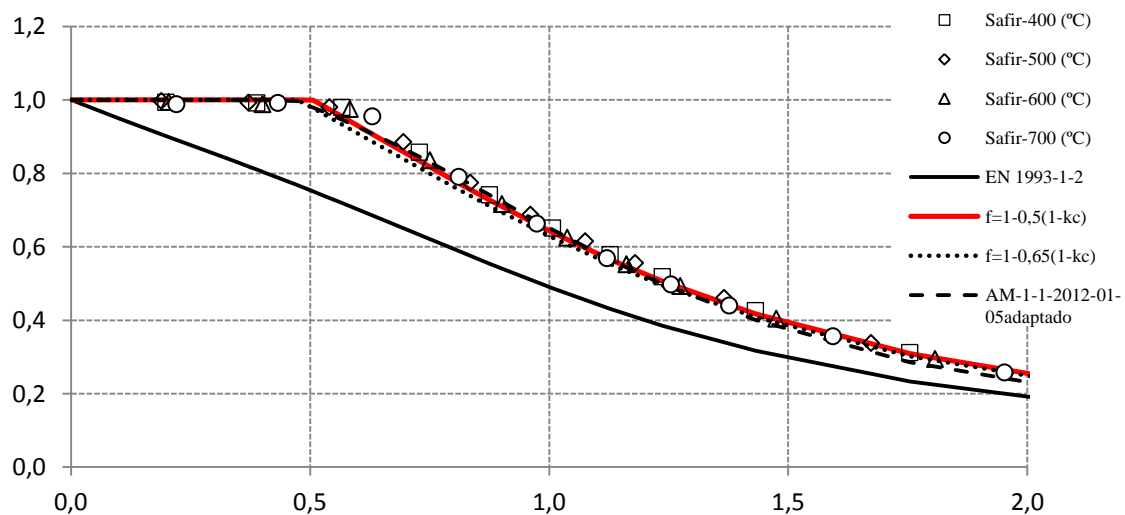
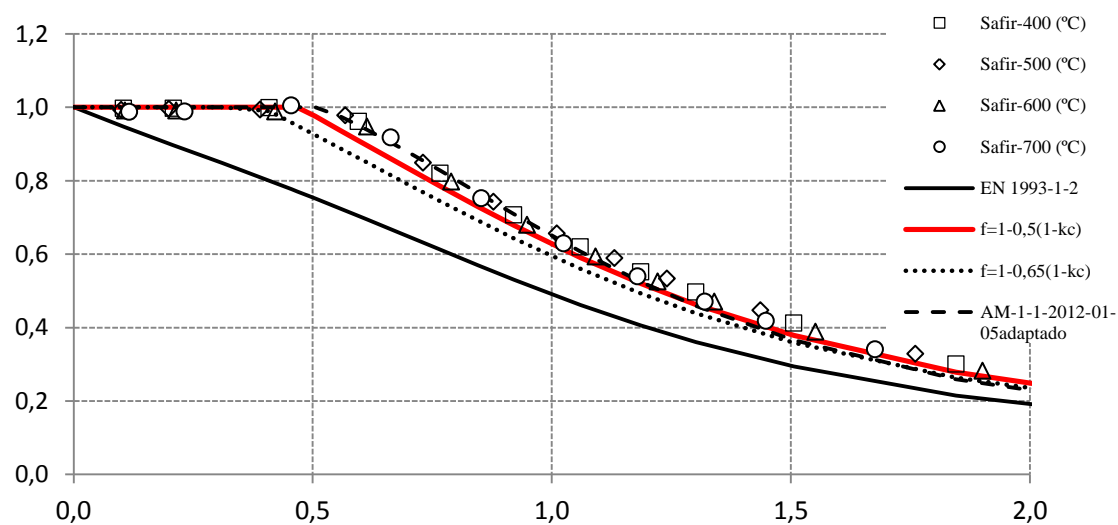
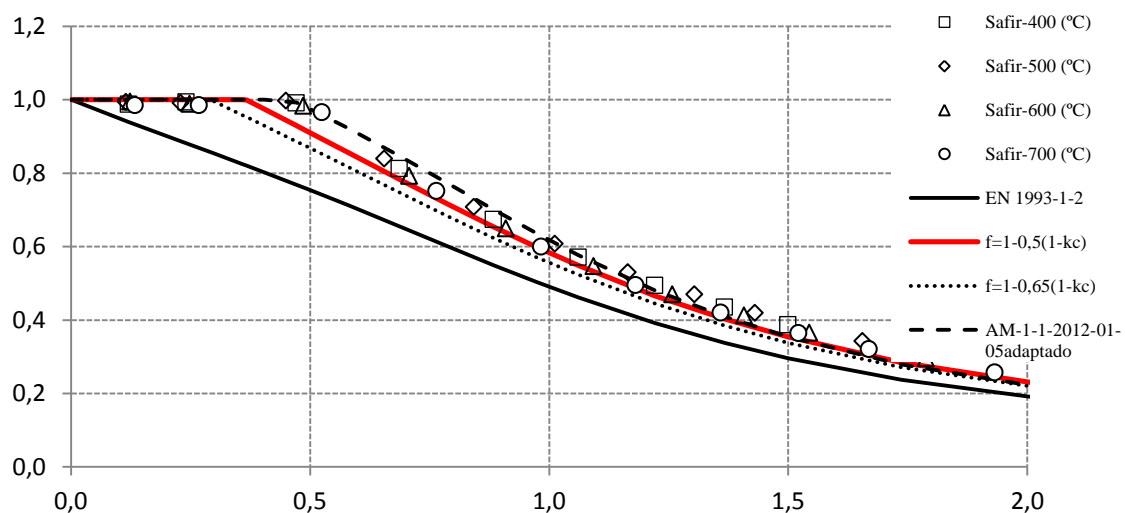


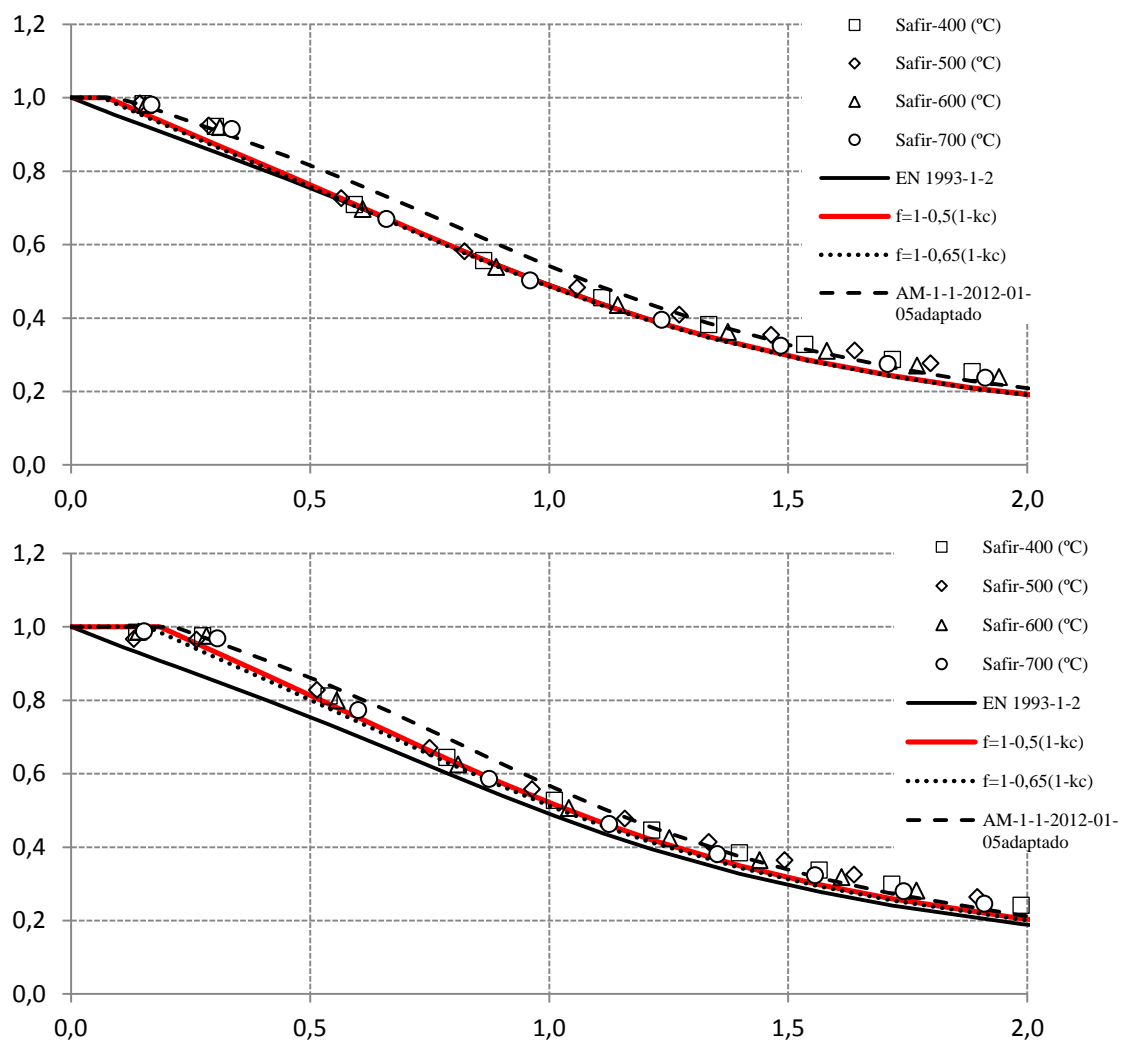




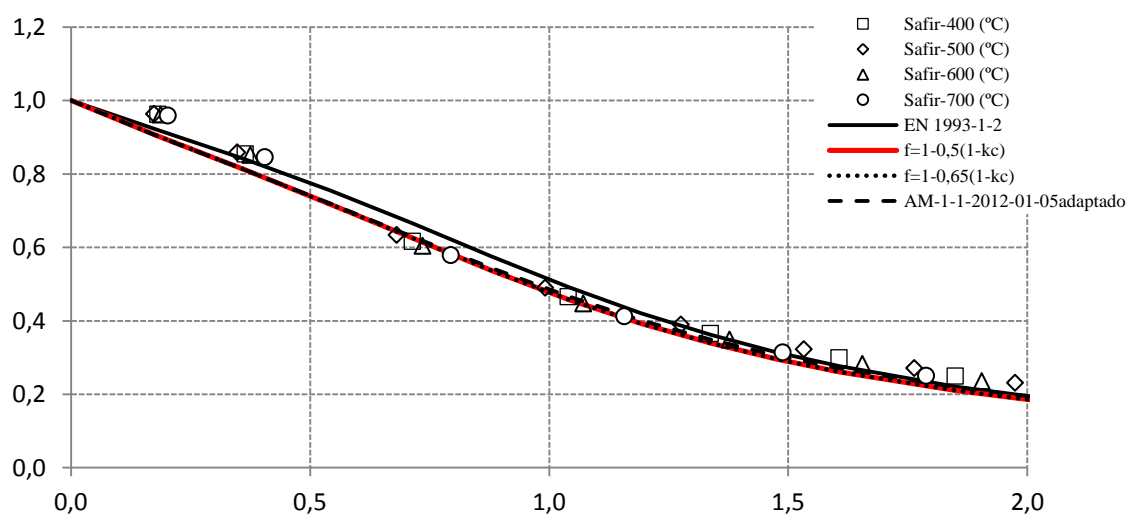
IPE 500 Laminado S 355

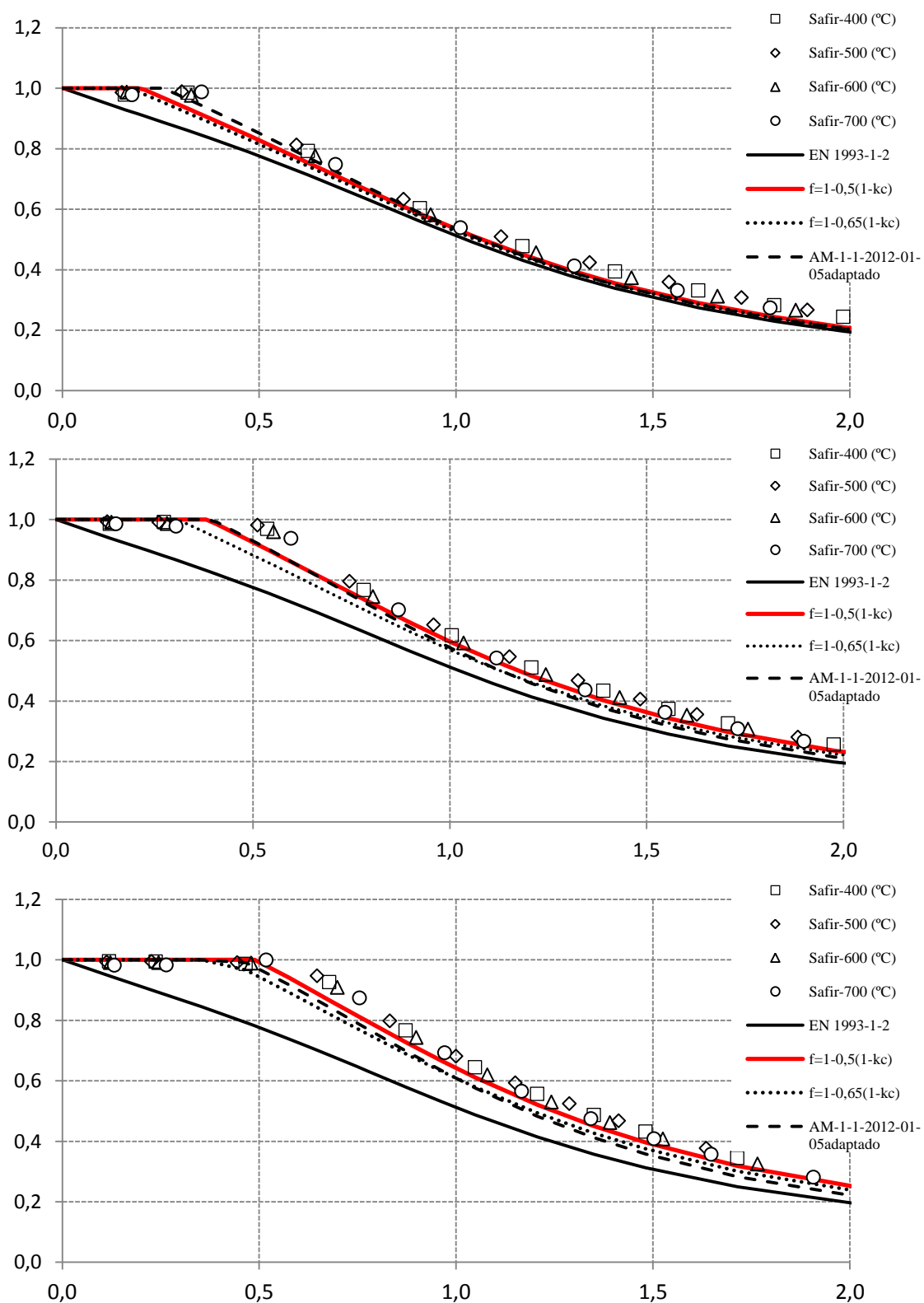


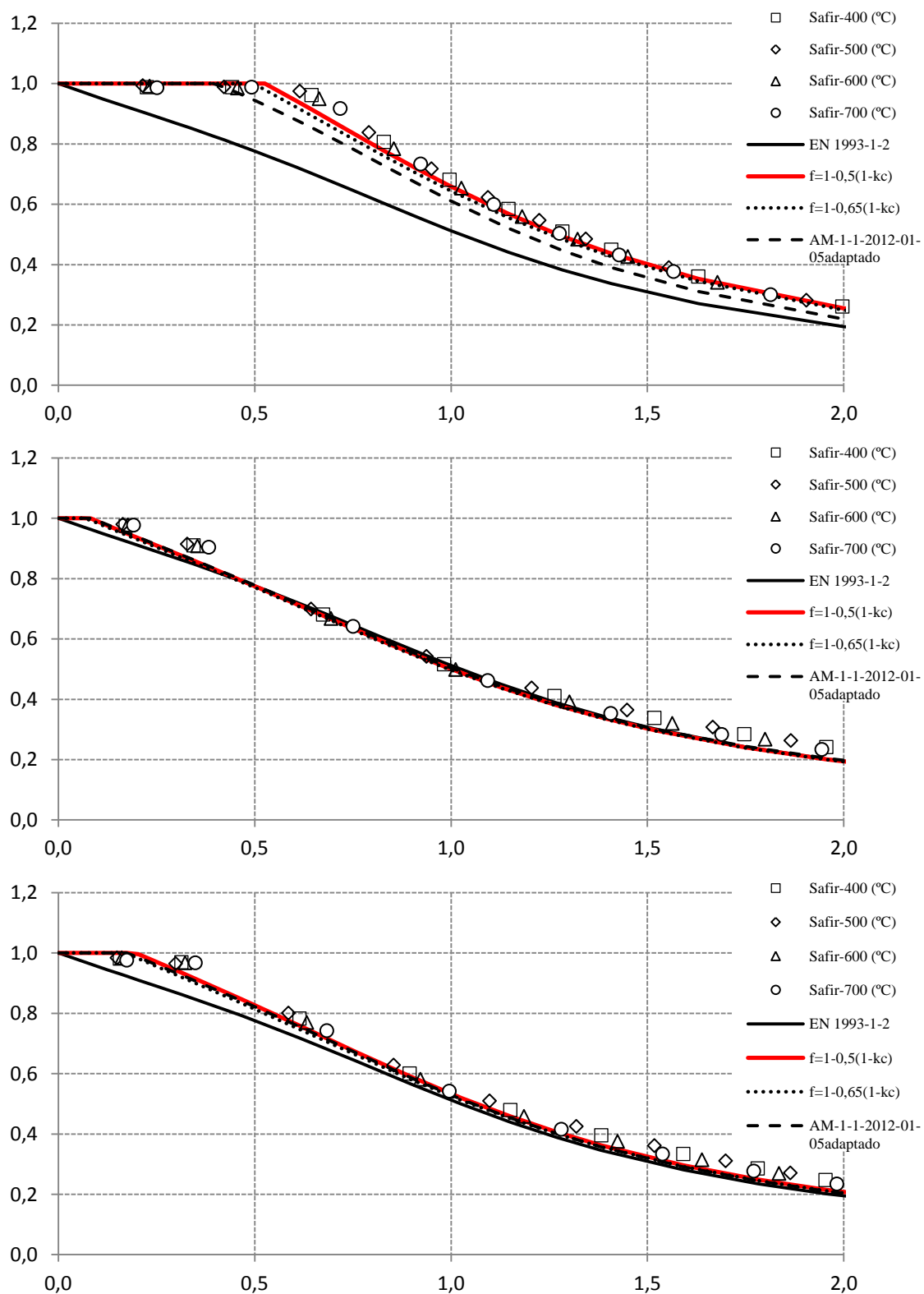




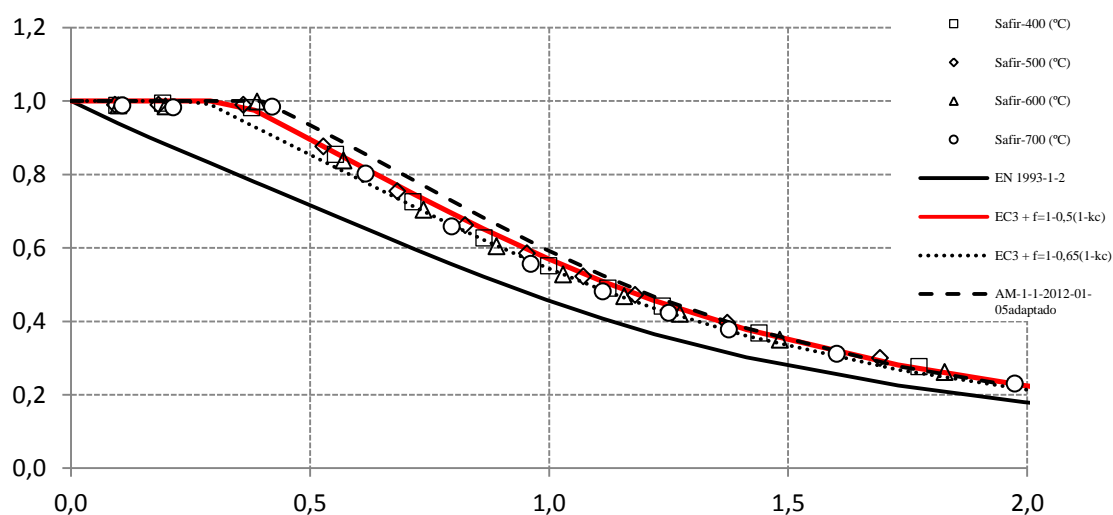
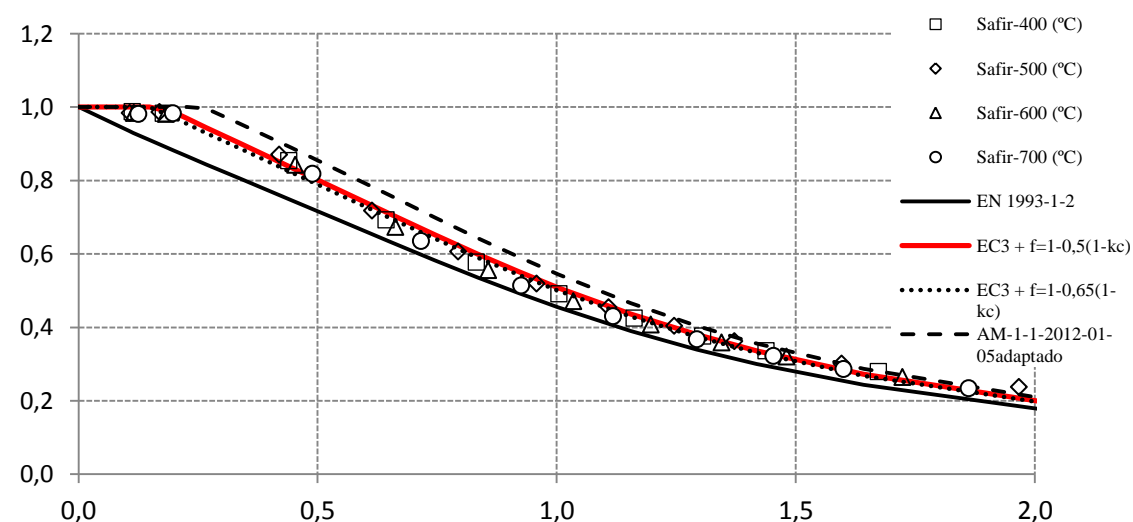
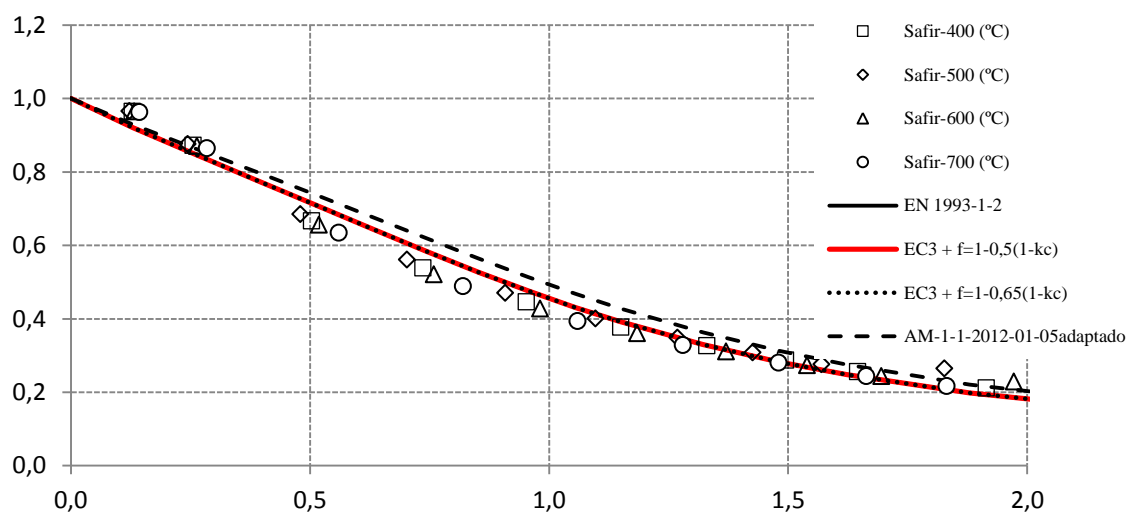
IPE 500 Laminado S 460

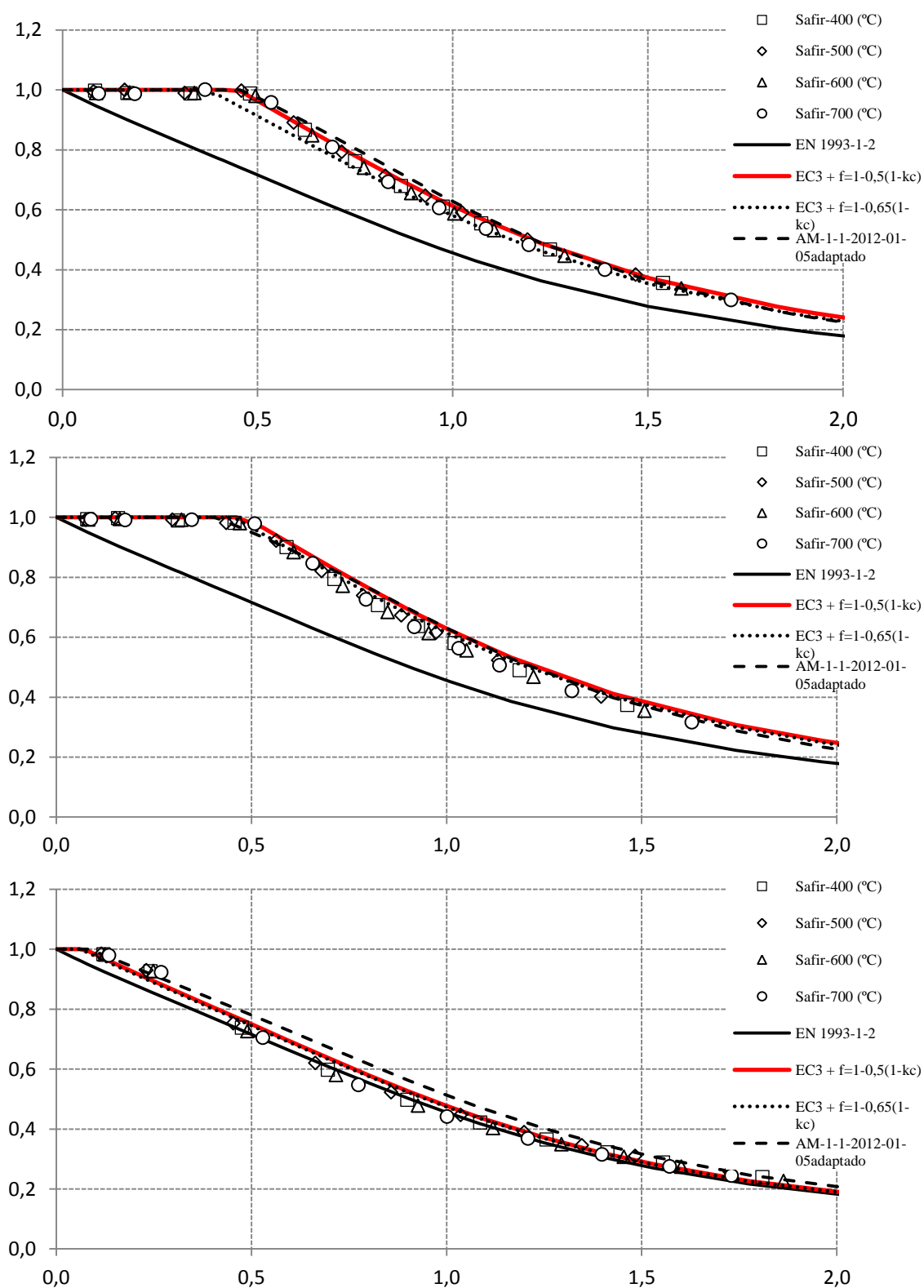


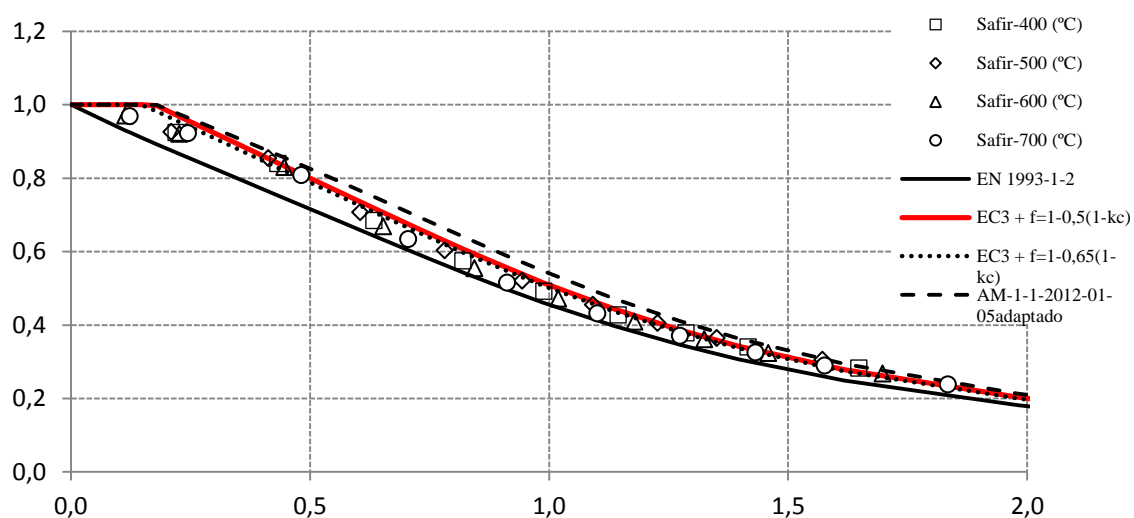




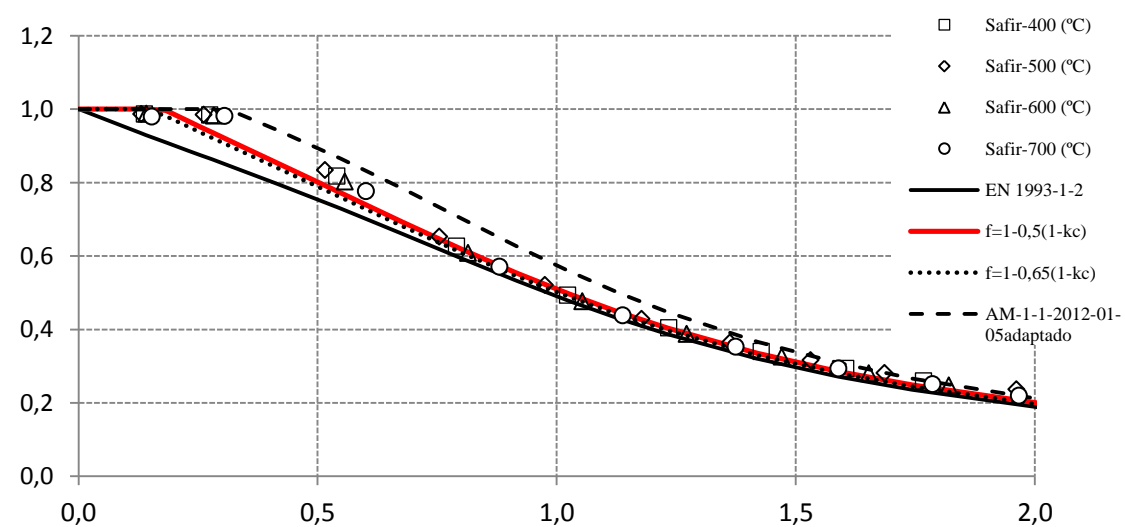
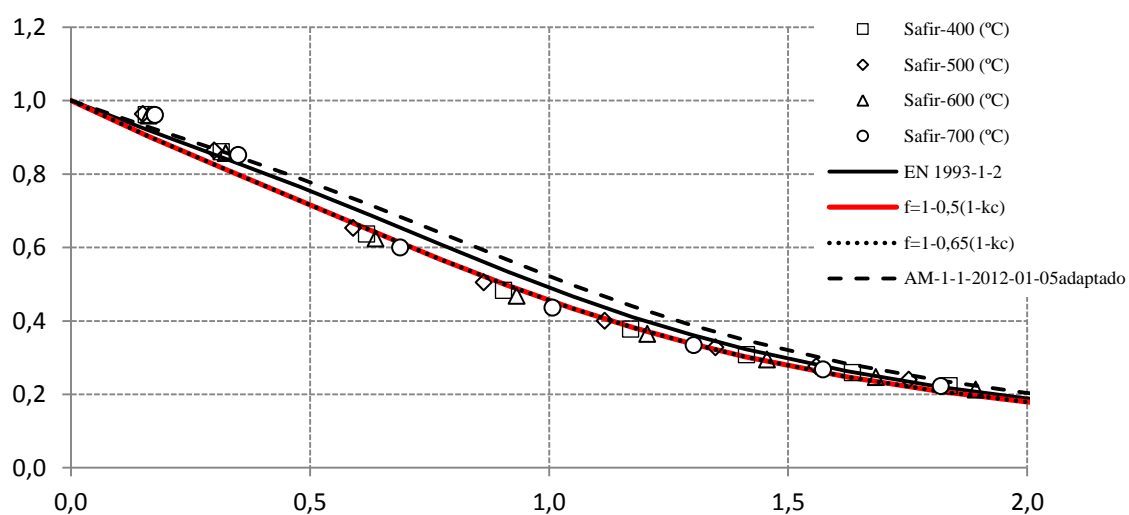
IPE 500 Soldado S 235

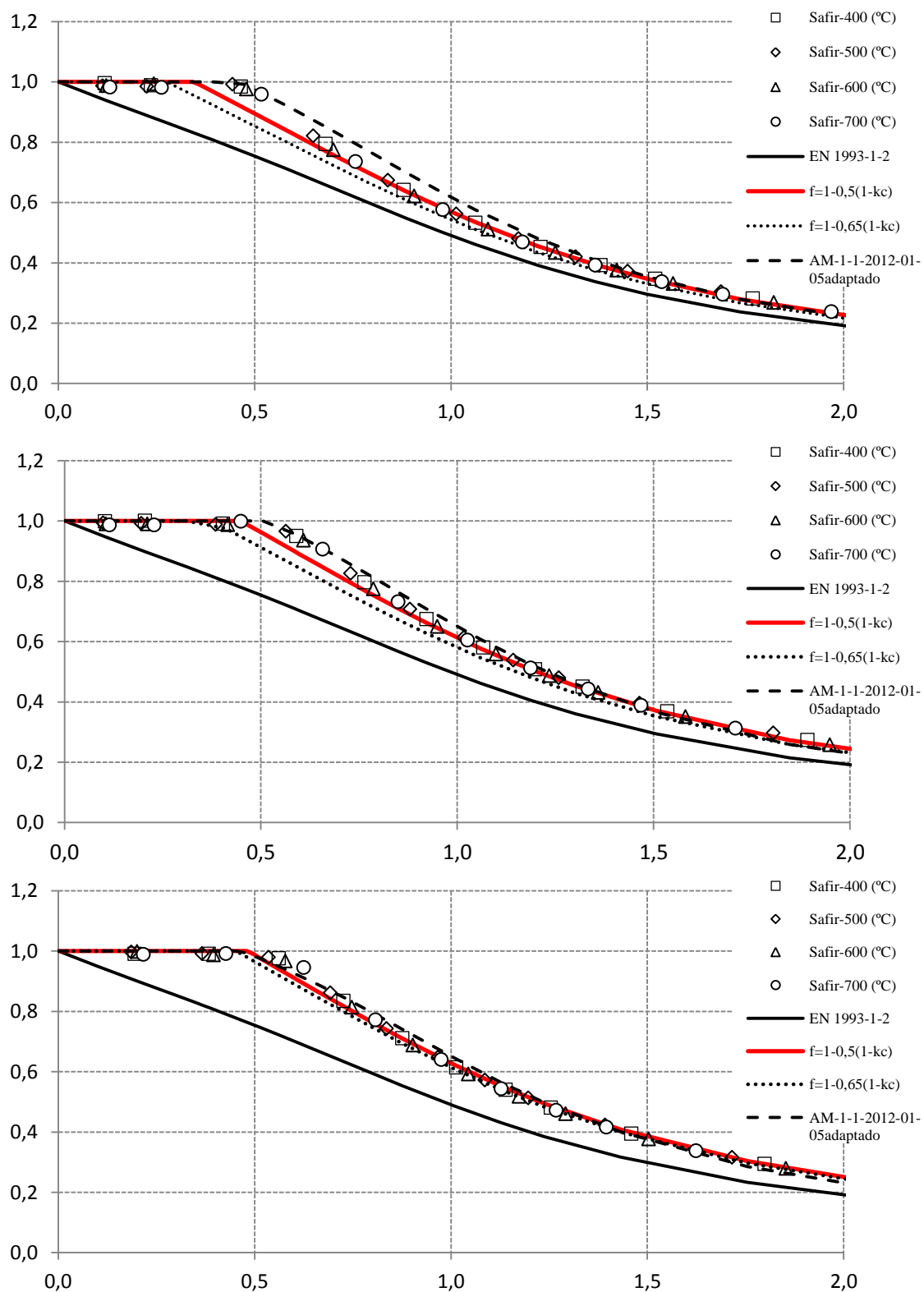


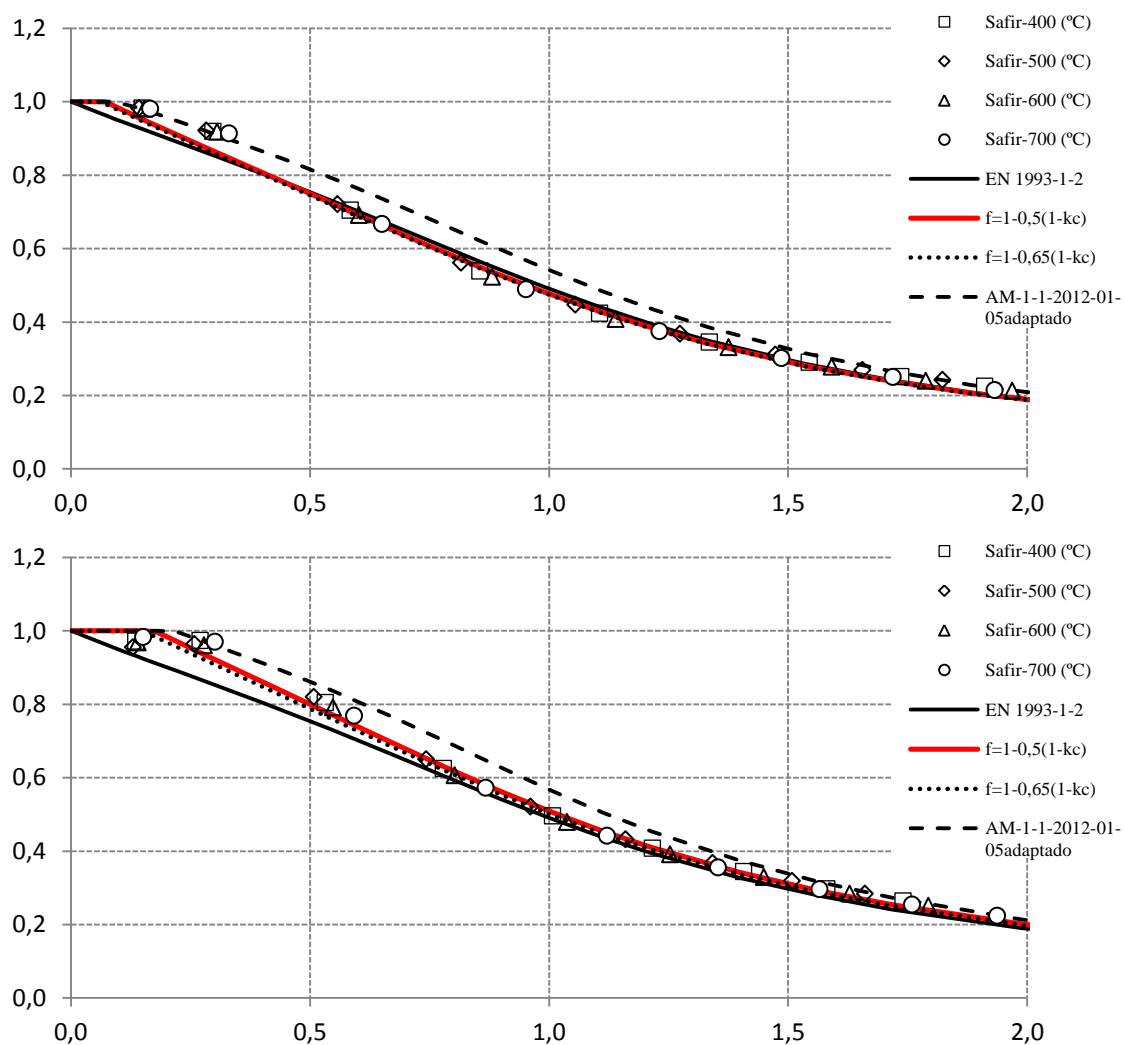




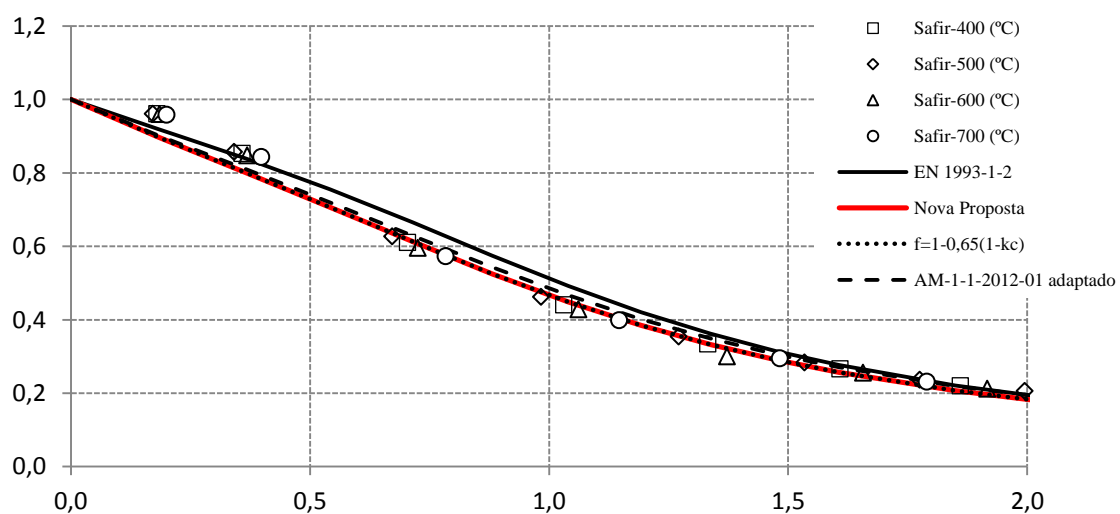
IPE 500 Soldado S 355

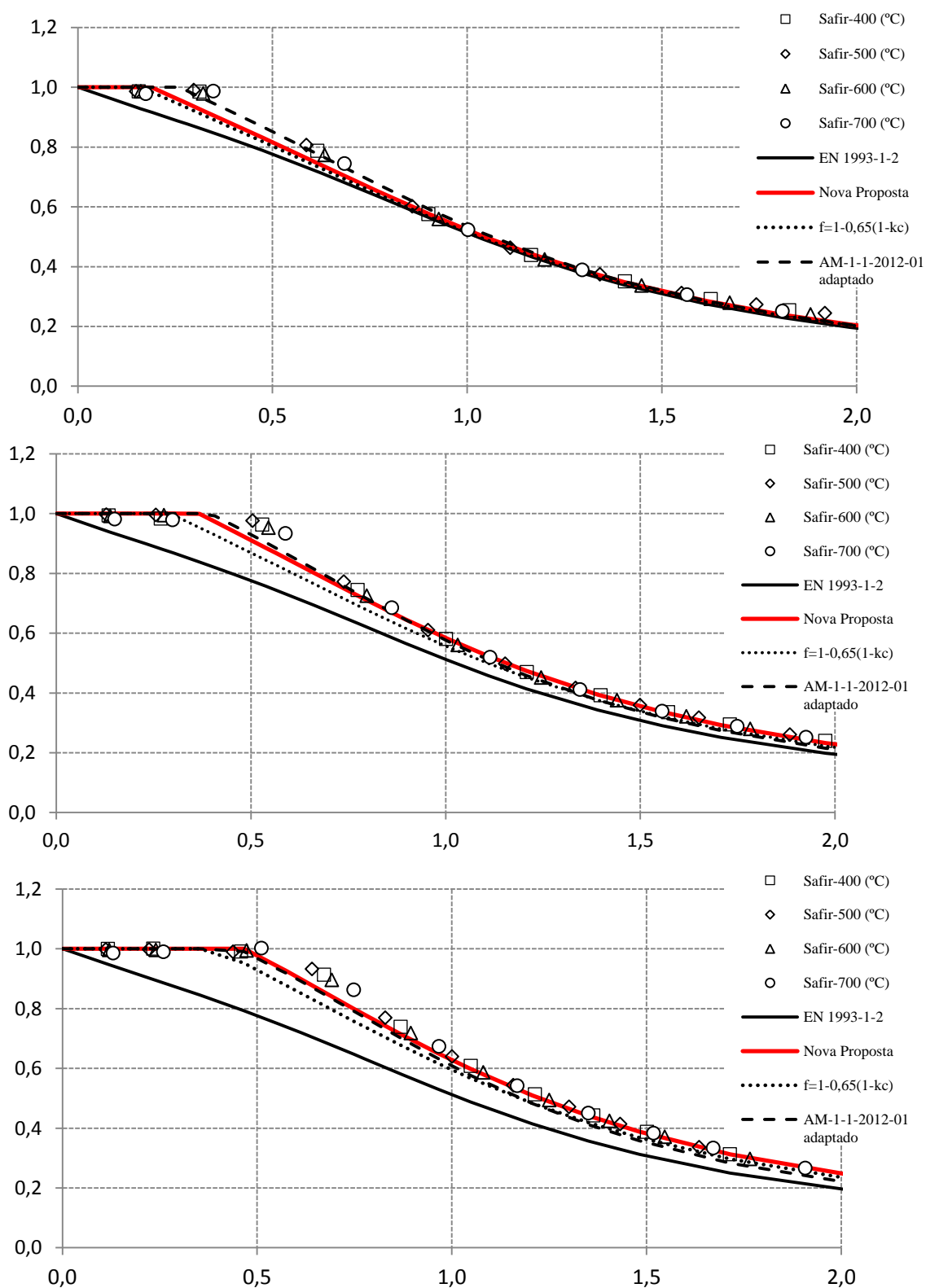


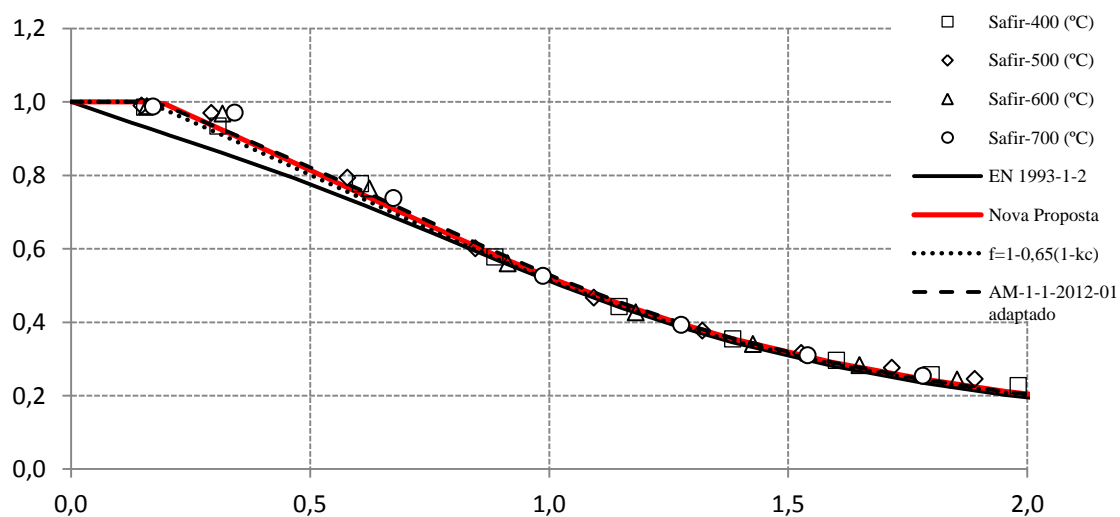
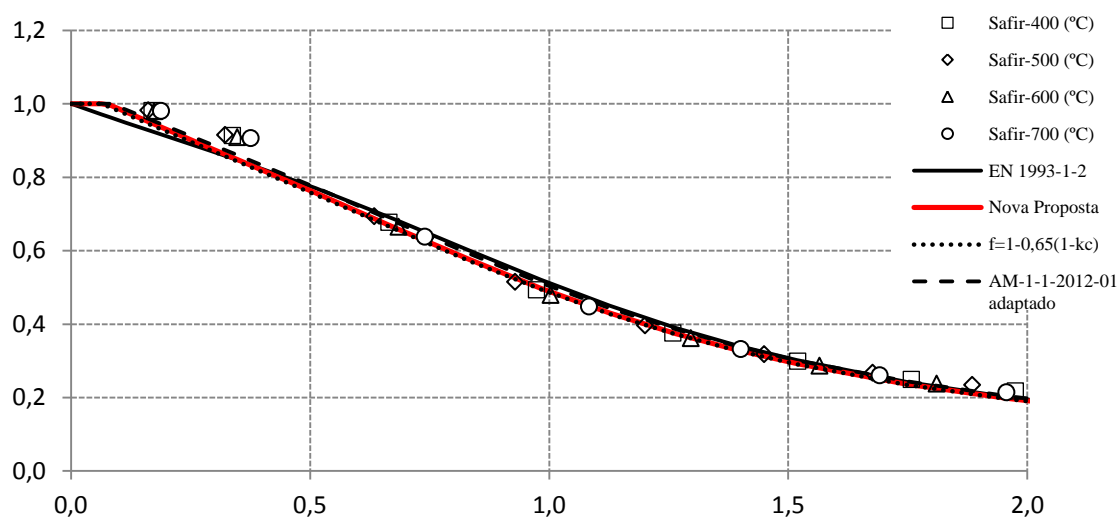
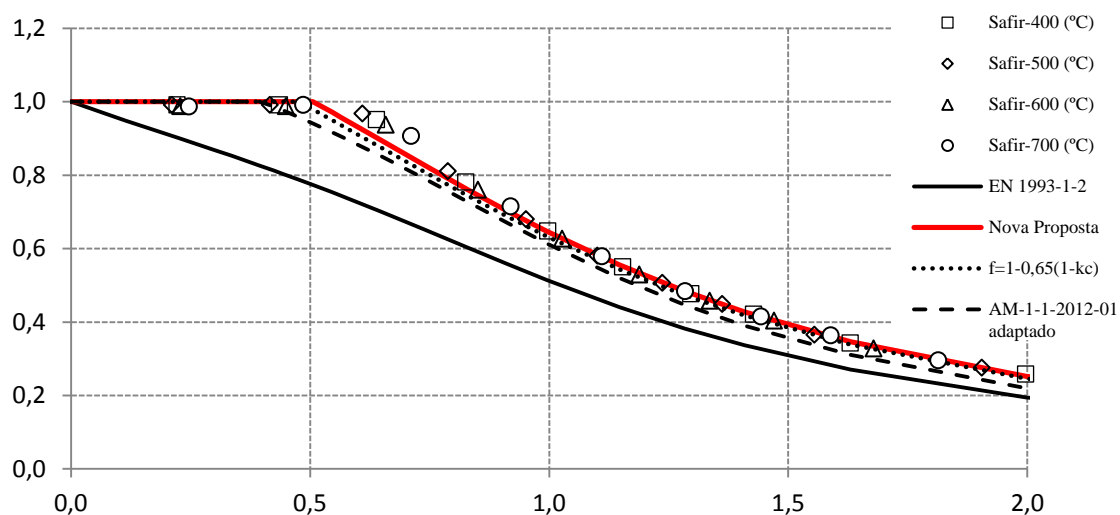




IPE 500 Soldado S 460

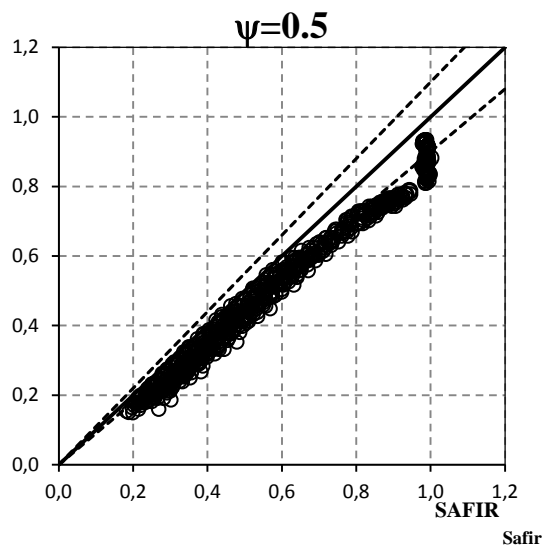




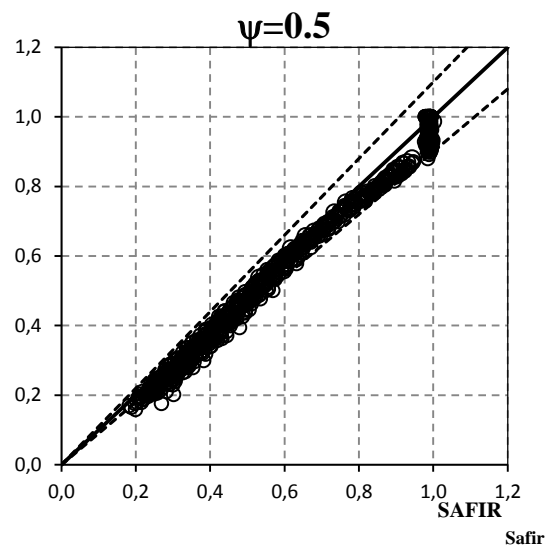


Gráficos estatísticos dos restantes carregamentos

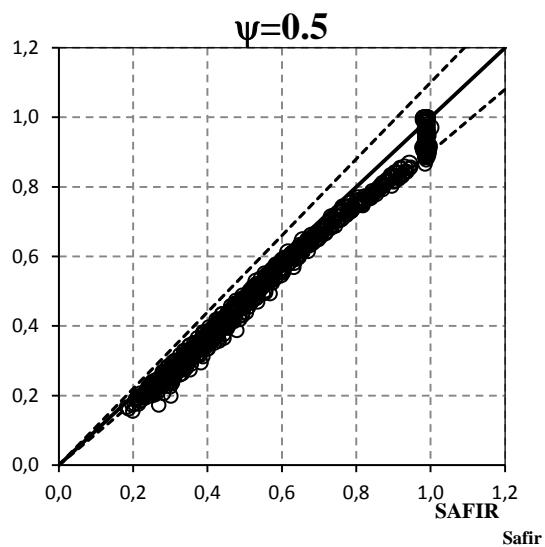
EN 1993-1-2



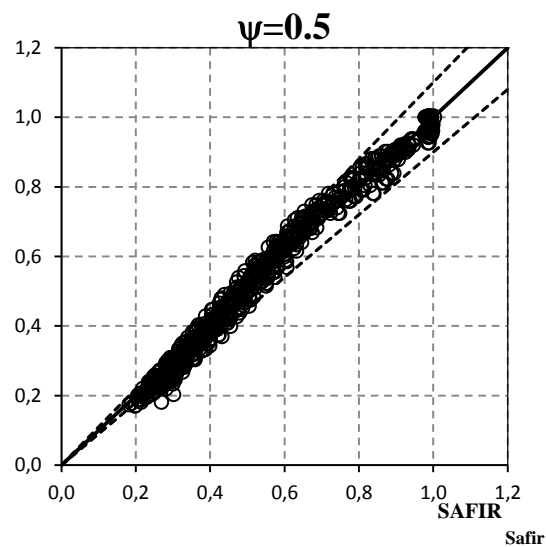
$f = 1-0.5(1-kc)$



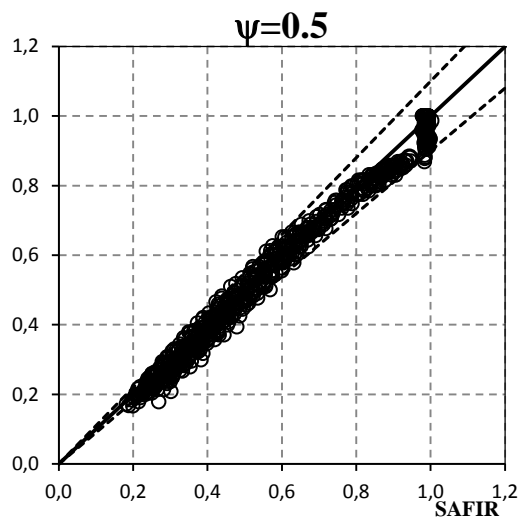
$f=1-0.65(1-kc)$



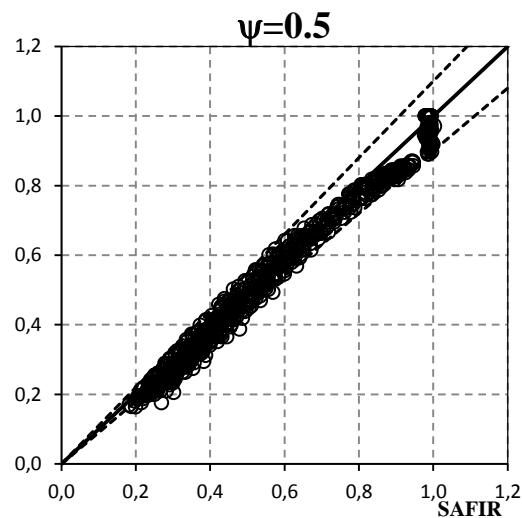
AM-1-1-2012-01_{adaptado}



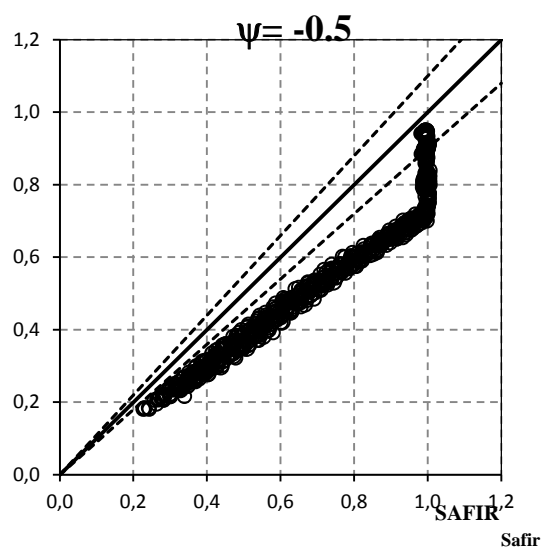
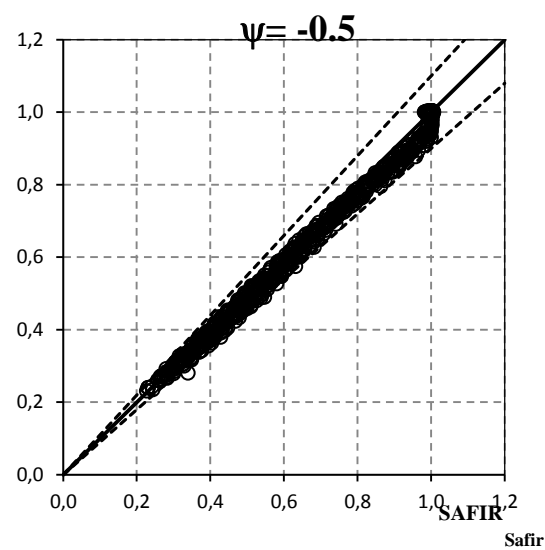
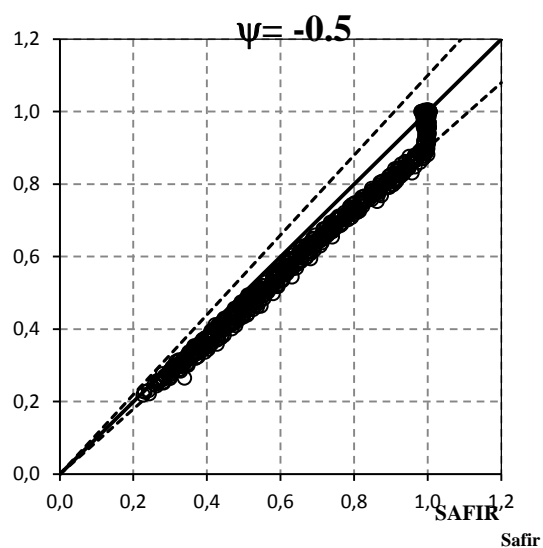
EN1993-1-2 + $f=1-0.5(1-kc)$



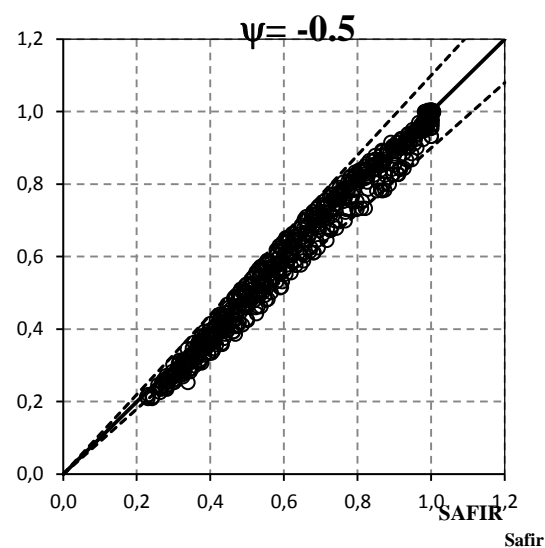
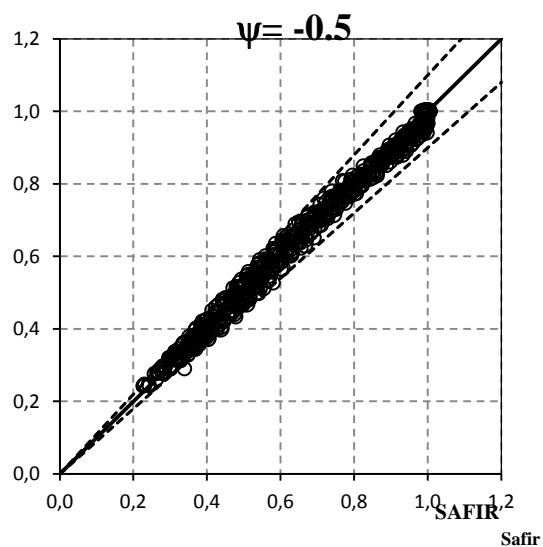
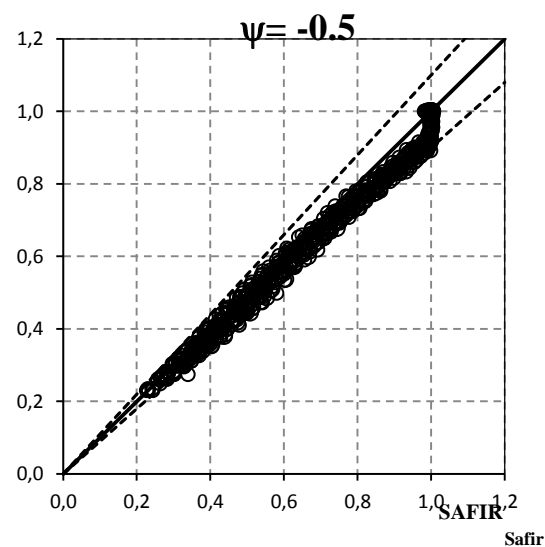
EN1993-1-2 + $f=1-0.65(1-kc)$



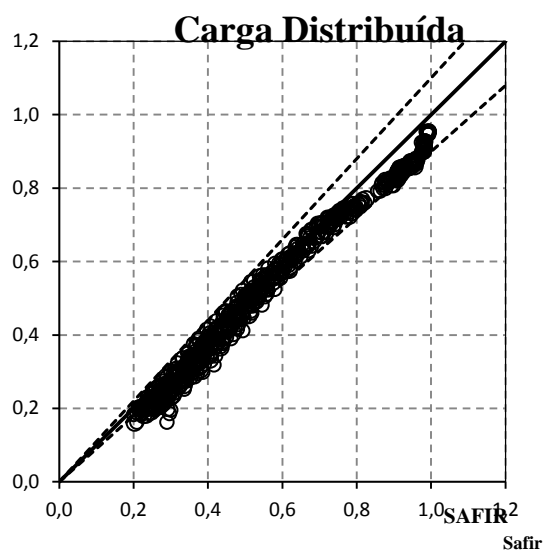
EN 1993-1-2

 $f = 1-0.5(1-k_c)$  $f=1-0.65(1-k_c)$ 

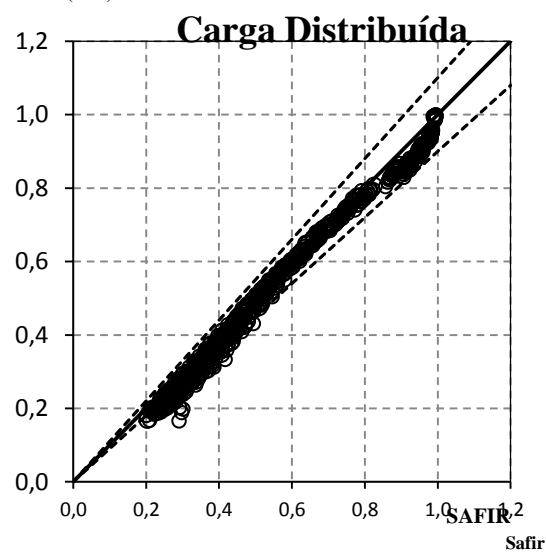
AM-1-1-2012-01adaptado

EN1993-1-2 + $f=1-0.5(1-k_c)$ EN1993-1-2 + $f=1-0.65(1-k_c)$ 

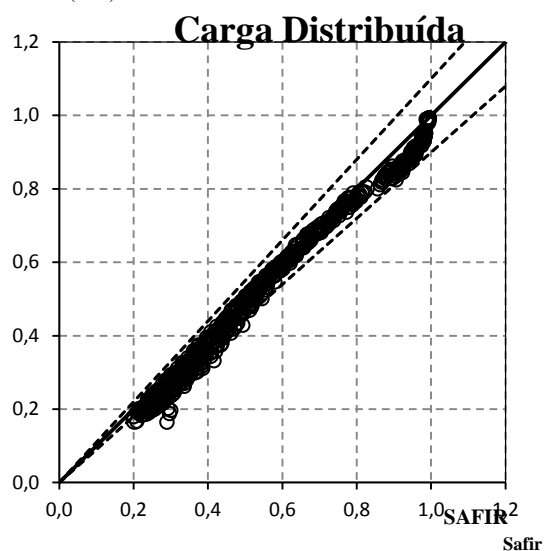
EN 1993-1-2



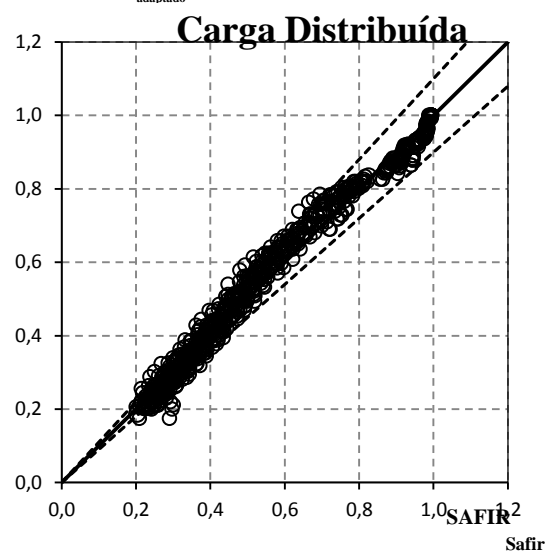
$f = 1 - 0.5(1 - k_c)$



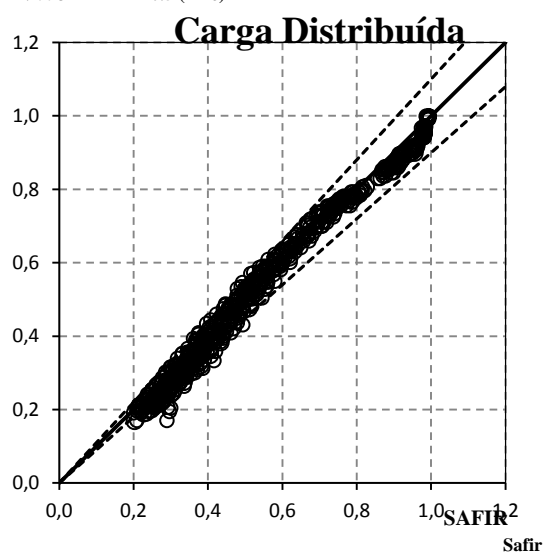
$f = 1 - 0.65(1 - k_c)$



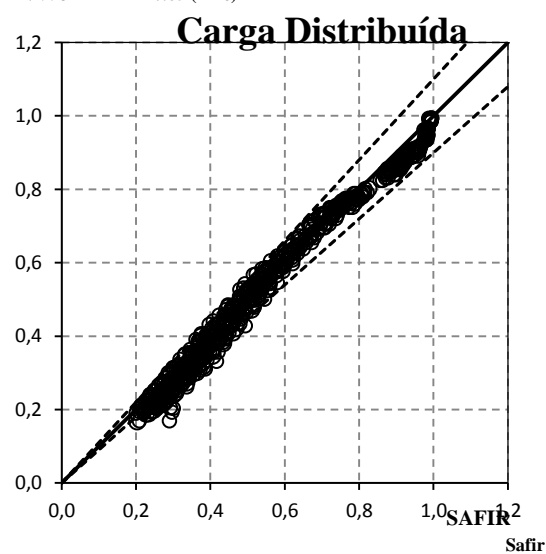
AM-1-1-2012-01_{adaptado}



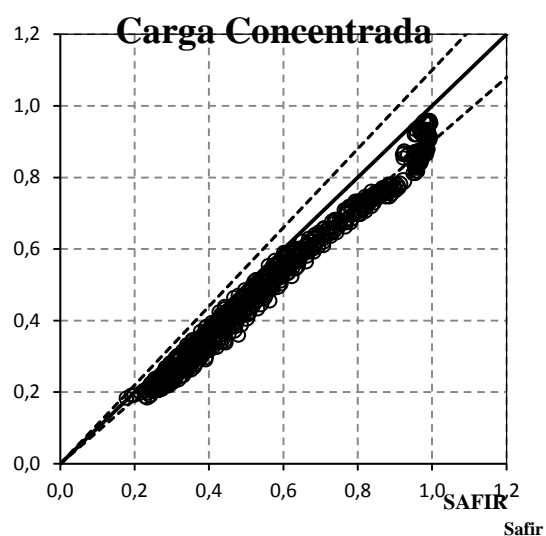
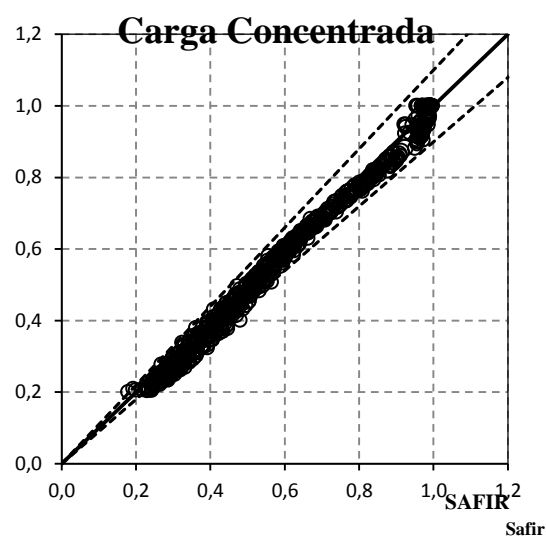
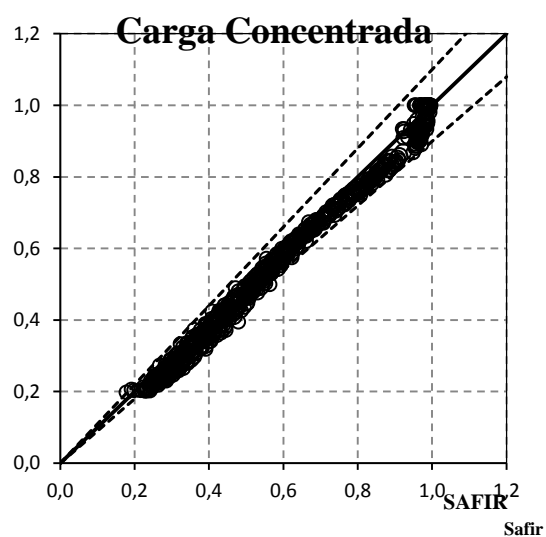
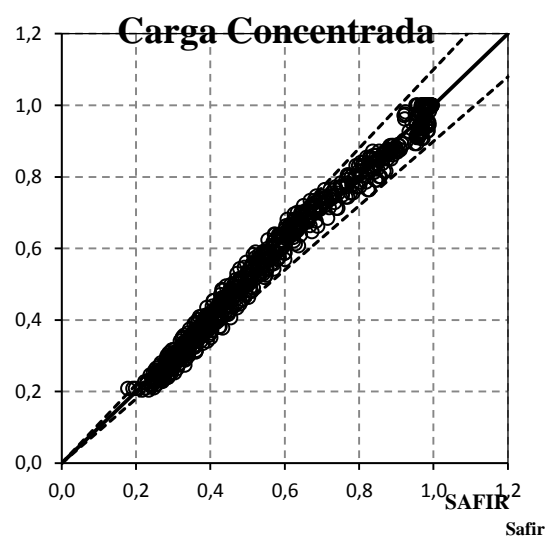
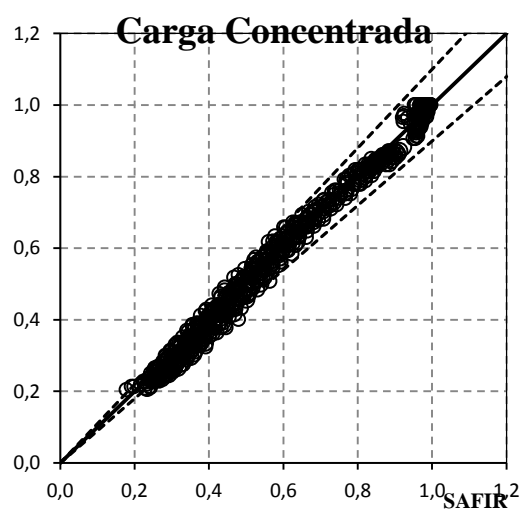
EN1993-1-2 + $f = 1 - 0.5(1 - k_c)$



EN1993-1-2 + $f = 1 - 0.65(1 - k_c)$



EN 1993-1-2


 $f = 1 - 0.5(1 - kc)$

 $f = 1 - 0.65(1 - kc)$

AM-1-1-2012-01_{adaptado}

EN1993-1-2 + $f = 1 - 0.5(1 - kc)$

EN1993-1-2 + $f = 1 - 0.65(1 - kc)$
